

Instrumentación del proceso de fermentación tipo escalera del cacao

Yeinner Andres Alvarez Cardona

Daniel Esteban Girón Lerma

MS.c Wilson Pérez Castro

Ingeniería Mecatrónica- Ciclo III Ingeniería en Mecatrónica- Facultad de Tecnología

Universidad Tecnológica de Pereira

2020

INTRODUCCIÓN

El cacao es un fruto que surge de tierras cálidas, de este se pueden elaborar diferentes subproductos, el más conocido es el chocolate, pero para que el cacao pueda brindar todas sus propiedades y convertirlas a productos de consumo humano, primero debe pasar por su etapa de recolección hasta llegar a su etapa de secado. Una de sus etapas donde el cacao adquiere su aroma y sabor particular es la etapa de fermentación, dicha etapa tiene componentes que interactúan entre ellos para darle al grano de cacao las propiedades que son tan llamativas para el ser humano. La etapa de fermentación consta de 3 a 5 días variando del clon o grano de cacao que se esté fermentando.

Para ello se consultaron teorías expuestas por diferentes autores y que procedimiento fue el que ellos acogieron, además se presenta una breve reseña histórica y normas que abarcan al cacao.

El siguiente proyecto consta de un diseño que cuenta con varios sensores enfocados a la medición de variables que afectan directamente el proceso de fermentación del cacao, este proyecto constara de 3 etapas, las cuales consisten en el desarrollo de la tarjeta electrónica por medio del software EAGLE, la segunda etapa constara del diseño de la caja protectora o carcasa que cubrirá el instrumento de medición, esta etapa se realizó en el programa Inventor Professional 2019 y por último se observara una interfaz básica entre los sensores y un computador desarrollado en LabVIEW 2013, el cual tendrá como función el monitoreo de la temperatura y Ph en la caja fermentadora.

El diseño de la tarjeta electrónica se realizó en una PCB doble fas dando una mayor comodidad al momento de realizar las conexiones entre elementos, y para la transmisión de datos se hicieron todos los arreglos con base de un XBee, el cual consta con una cobertura lo suficiente para transmitir datos en el ambiente de trabajo.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar la instrumentación del proceso tipo escalera para la fermentación del cacao.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar el estado del arte acerca de los avances tecnológicos del proceso de fermentación del cacao.
- Seleccionar que tipo sensores son los adecuados para ser implementados en el proceso de fermentación tipo escalera del cacao.
- Plantear una interfaz básica para la recolección de los datos de los sensores.
- Realizar un diseño en CAD del proceso de fermentación tipo escalera.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL:	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	3
CAPÍTULO 1 - PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO	8
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	8
1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS PROCESOS DEL GRANO DE CACAO.....	9
1.3 LEYES Y NORMAS	13
CAPÍTULO 2 - SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y LA LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	15
2.1 PARÁMETROS QUE INFLUYEN DIRECTAMENTE EN EL SABOR Y AROMA DEL CACAO	16
2.2. TIPO DE SENSORES USADOS EN LA ETAPA DE FERMENTACIÓN DEL CACAO	18
2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN	19
2.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL	19
2.3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA	20
2.3.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE PH	20
2.4 INSTRUMENTOS Y EQUIPOS A UTILIZAR	21
2.4.1 ARDUINO UNO.....	21
2.4.2 SENSOR SI7021 I2C	23
2.4.3 SENSOR DE PH E201-BNC + MODULO CONTROLADOR PH-4502C	25
2.3.5 XBEE S2CTH.....	26
2.3.6 MODULO CARGADOR BATERÍA DE LIPO 1A MICRO USB- 5V – TP4056	28
2.3.7 MODULO ELEVADOR DE VOLTAJE 5V USB, CONVERTOR DC-DC 0.9V A 5V.....	29
2.4.1 CÁLCULOS TEÓRICOS DEL PANEL SOLAR	33
2.4.2 BATERÍA.....	35
2.4.3 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA.....	36
CAPÍTULO 3 - INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL MONITOREO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN.....	36

3.1 SOFTWARE PARA LA CREACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, MONITOREO Y CONTROL.....	36
3.2 DISEÑAR LA INTERFAZ ENTRE EL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL Y EL USUARIO, TENIENDO EN CUENTA LAS NECESIDADES DEL PROCESO.....	37
CAPÍTULO 4 - DISEÑO EN CAD DEL SISTEMA PARA PROCESO DE FERMENTACIÓN TIPO ESCALERA.....	39
4.1 DISEÑO EN CAD EL PROCESO DE FERMENTACIÓN TIPO ESCALERA DEL CACAO, EL CUAL CONTENGA LA UBICACIÓN DE LOS SENSORES.....	39
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS	45
Bibliografía.....	52

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Arduino UNO	23
Figura 2. Sensor SI7021 i2C	24
Figura 3. Conexión del Arduino UNO con el sensor SI7021 i2C	25
Figura 4. Sensor de pH E201-BNC + Modulo controlador pH-4502C	26
Figura 5. XBee S2CTH.....	27
Figura 6. Conexión del XBee con el Arduino UNO.....	28
Figura 7. Módulo TP4056.	29
Figura 8. Modulo elevador 5V USB	30
Figura 9. Esquemático del circuito de regulación y carga de baterías.....	31
Figura 10. Esquemático del circuito de control.....	32
Figura 11. Mapa de conexiones.....	32
Figura 12. Diagrama de bloques.....	38
Figura 13. Transmisión de datos de LabVIEW a Excel.....	38
Figura 14. Caja para fermentación de cacao..	39
Figura 15. Planos de caja para fermentación de cacao.....	40
Figura 18. Caja uno, parte dos.....	42
Figura 19. Planos caja uno, parte dos.....	42
Figura 21. Planos caja Arduino parte uno..	43
Figura 22. Caja Arduino parte dos.....	44
Figura 23. Planos caja Arduino parte dos.	44
Figura 24. Circuito de regulación y carga de baterías Board..	45
Figura 25. Circuito de control.....	46
Figura 26. Panel de frontal guardado de datos.	467
Figura 27. Panel frontal visualizador de datos.	46
Figura 28. Carcasa sensores terminada	46
Figura 29. Carcasa Arduino finalizada.....	46

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Fases del proceso de fermentación.....	18
Tabla 2. Cuadro comparativo	19
Tabla 3.Cuadro comparativo de sensores.....	20
Tabla 4. Características técnicas del Arduino UNO.	22
Tabla 5. Características de SI7021 I2C.....	24
Tabla 6. Características del XBee S2C.	27

CAPÍTULO 1 - PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO

En este capítulo se hablará del cacao, contextualizando su historia y como nuestros ancestros lo procesaban, además se mencionan estudios recientes del proceso de fermentación del cacao y como las nuevas tecnologías han colaborado en su estudio y producción, por último, se establecen las normas que a nivel nacional abarcan al cacao sobre sus etapas y sus parámetros.

El cacao es un fruto en forma de mazorca, su contenido es muy dulce, y siguiendo unas pautas principales se puede llegar a tener una variedad amplia de productos, pero su principal y por ende más conocido subproducto del cacao, es el chocolate, partiendo de esto se presenta parte de su historia, leyes y teorías que ha dejado el cacao.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

Uno de los alimentos que américa latina dio al mundo después de la conquista española fue el cacao, no es uno de los más significativos económicamente pero si uno de los más simbólicos y fundamentales para la historia del ser humano, simbólico por ser un producto que representa al continente americano, cabe decir, desde la época de los aztecas y mayas en México, el chocolate era consumido en grandes cantidades, además con la llegada de los españoles se dio a la criollización del chocolate, pero los españoles no le agregaron chile y ají como lo hacían los indígenas, ellos le agregaron al chocolate otros insumos como lo son, azúcar, canela, ajonjolí y vainilla, dando esto a una revolución y una mezcla de sabores que continua hasta el día de hoy [1].

Para poder llegar a este particular producto, el cacao debe de pasar varias etapas para convertirse en chocolate, la fermentación y el secado del grano es de crucial importancia para obtener un sabor y aroma adecuado, cada paso que hace el cacao, durante su desarrollo, todo debe de estar parametrizado y controlado [2]. Con lo dicho, se puede concluir que cada etapa del cacao debe de ser supervisada con tiempos predeterminados y con la ayuda de elementos

tecnológicos, esta labor puede ser más sencilla y brindar frutos de mayor confiabilidad hacia el mercado el cual se desee atacar.

1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS PROCESOS DEL GRANO DE CACAO

En América Latina podemos encontrar grandes productores de cacao, naciones como Brasil, Perú y Colombia, son países que exportan toneladas considerables de cacao anualmente, convirtiéndose este producto en un pilar que se refleja en la economía de cada país, además a nivel mundial, países como Costa de Marfil, exportan cacao por toneladas, siendo este el mayor productor de cacao con una cifra de 2.200 toneladas anuales [3], pero para su producción se debe de ser estricto, cada etapa debe estar bien registrada y controlada, siendo sometido el producto a espacios específicos para su producción, desde la esterilización de herramientas, hasta controlar las variables que afectan el proceso del grano en todas sus etapas, también se debe de ser riguroso con la elección de la planta que se va a sembrar, debido a que cada una tiene diferencias en cuanto al terreno, clima, cantidad de agua de consumo, entre otras [4].

El sistema de fermentación más usado en Colombia es el proceso que involucra cajones de madera, la madera que se emplea para la fabricación de los contenedores no debe aportar ningún olor o aroma que perjudique el sabor de la almendra que se va a fermentar. Comúnmente los cajones deben tener una forma cubica con medidas mínimas de 75 centímetros de ancho, 75 centímetros de largo y 75 centímetros de alto. Se recomienda que los cajones contengan aproximadamente 210 kilos de cacao fresco. No es recomendable fermentar menos de esta cantidad en cajones fermentadores. Esta forma geométrica brinda un mejor comportamiento de conservación térmica comparado con otras formas de fermentado como lo son sacos plásticos, bandejas de madera tipo Rohan, barriles de madera, entre otros. [5]

El uso de tecnología en los procesos agrícolas resulta beneficioso para el sistema, tal como lo dice Ángela María Hernández, en su proyecto sistema de riego automatizado por micro aspersión para el cultivo de cacao en el municipio de Cabuyaro en el departamento del Meta

Colombia [6], en su trabajo concluye con que el uso de sistemas automatizados de riego para el cultivo de cacao es una opción recomendada para aumentar la producción, viéndose reflejado en un 10%, además estas tecnologías no generan problemas de tipo legal o ambiental, de esta manera se enfatiza en los sectores agrícolas, si estos invierten en la implementación de tecnología siendo uno de ellos el sistema riego, la elaboración de su producto pueden tender a mejorar.

Un factor que se ve involucrado en la fermentación del cacao es el pH, esta variable repercute directamente en la tasa de crecimiento microbiano debido a que existen un “pool” de bacterias en su etapa inicial y muchas de ellas pueden convivir en ambientes neutrales de pH, por lo consiguiente se da a la conclusión de que si este valor aumenta o disminuye la tasa de producción de productos de la fermentación se ve ralentizado. El nivel de pH tiende a cambiar por diferentes razones, una razón puede ser por la generación de ácidos orgánicos como el ácido acético y el ácido láctico como resultado del metabolismo del sustrato con algunas bacterias y comúnmente se desarrolla en las etapas aeróbicas del proceso. Otro parámetro que influye en la fermentación es la temperatura enfocado a control de procesos, la temperatura es una variable importante de control y una de las pocas que pueden ser controladas mediante sistemas de intercambio de calor, todo esto puede variar y generar aspectos negativos durante el proceso el cual limita la actividad microbiana y por ende la aceleración de los índices de muerte microbiana en la fermentación.

La fermentación es un proceso que va encajado con el sabor y aroma del chocolate, para esto se ve necesario el aumento de temperatura durante el proceso, dando como resulta la eliminación del embrión que se encuentra en la semilla, además si se pretende hacer chocolate con los granos sin fermentar se verá afectado su sabor, dado que el grano es amargo, este sabor lo adquiere a la presencia de metil-xantinas como la teobromina y la cafeína en el cotiledón, estos también son astringente debido a la presencia de polifenoles y taninos, en su mayoría flavonoides y antocianinas.

Según el estudio realizado por Rosa Paulina Bohórquez, titulado: “Automatización de un sistema de fermentación de almendras de cacao para pequeños productores”, nos da a conocer

la importancia de la variable temperatura en el proceso de fermentación del cacao [7], donde se dan a conocer los valores de temperatura en los tres primeros días, después de haber transcurrido 24 horas desde que inició el proceso de fermentación el valor de la temperatura alcanza un valor por encima de los 30°C y se puede considerar como el mejor tratamiento, debido el cacao empieza a obtener características organolépticas, de haber pasado 48 horas de fermentación la temperatura sigue en aumento debido a la actividad microbiana y las reacciones químicas que se dan como es la transformación del alcohol a ácido acético y del ácido acético a dióxido de carbono, en su día tres para ser más exacto a las 72 horas la temperatura en los granos de cacao tiende a disminuir todo esto se relaciona al decrecimiento de actividad microbiana.

Como se viene diciendo, en la producción del cacao se ve necesario el uso de tecnologías que faciliten el proceso, el uso de sensores que capten la información del sistema y la transforme a un idioma que el usuario pueda interpretar, y con base a esto puede tomar decisiones para el desarrollo óptimo del cacao, por ejemplo, es muy recomendable utilizar un termómetro digital el cual va ubicado a una profundidad de 15 cm del borde de la caja fermentadora. En Colombia se detectó una falla en el proceso de fermentación, debido a que los agricultores no tenían parámetros sobre las variables que intervienen en el proceso, por lo cual esta falla se vio reflejada en una fermentación dispareja en los granos de cacao, que afecta severamente el sabor y aroma del grano, concluyente se llevó a la elaboración de un roadmapping, conformando una ruta de planeación y ejecución para solventar falencias que se tenga en una fase o en un proceso, debido a esto la aplicación de roadmapping, unido con aportes de vigilancia tecnológica se tuvo una mejora en la etapa de post cosecha del cacao obteniendo resultados favorables en la fase de fermentación del cacao [8].

Según Sofía Acosta Bonilla, “ Se presenta un problema con los agricultores debido a su nivel de analfabetismo, se hace difícil que ellos puedan entender la información que se comparte, además el nivel de tecnología manejado por los agricultores es bajo, por ende, se ve necesario la implementación y el desarrollo de un proyecto el cual cuente con asistencia técnica adecuada, constante y eficiente que permita que los agricultores alcancen un mayor desarrollo tecnológico en el manejo de sus cultivos” [9].

En Ecuador se realizó un estudio de comparación de técnicas de visión artificial para determinar el grado de fermentación de varios tipos de granos de cacao en el proceso postcosecha, los productores y comercializadores tienen la habilidad de conocer el grado de fermentación del grano utilizando principalmente sus sentidos, como el tacto, el olfato y en algunos casos el gusto, el fin de esta investigación es la de recolectar todas las imágenes para así digitalizar el proceso de fermentación, para esto se tomaron más de 980 imágenes de diferentes semillas de cacao, a su vez se siguió un protocolo de doce (12) pasos, donde se concluye en el doceavo paso con la realización de un cuadro comparativo con todos los resultados, indicando tipo de grano, método utilizado, coeficiente e índice de validación, método de medición de error y tiempos de ejecución. Concluyendo con la complejidad que tiene el proceso de fermentación del cacao y la importancia que tiene el proceso en beneficio del cacao y por medio de tecnologías corregir procedimientos que por mucho tiempo se realiza de forma empírica y a su vez ser sustituidos por la aplicación de métodos y técnicas más eficientes como el reconocimiento de patrones y la visión artificial. [10]

El uso de herramientas tecnológicas que se empleen en el proceso de fermentación del cacao, se puede adquirir en tiempo real información sobre las variables que afectan al proceso, otorgando mayor confiabilidad en el producto que se entrega al mercado [10], sin embargo, hay granjas que no cuentan con un nivel económico estable que permita tener esta clase de tecnologías en sus cultivos, optando por procesos artesanales y en ocasiones ejecutados de manera errónea. Además hay poblaciones que manifestaron no contar con la técnica adecuada para medir la temperatura y poder evaluar las características externas e internas de los procesos de fermentación y secado [11], por ende, se han realizado diferentes estudios que permitan un proceso adecuado del cacao en todas sus etapas, con dispositivos no muy costosos que permitan al cacao ser elaborado de la manera que se tiene que hacer.

El cacao es un fruto en forma de mazorca que contiene un grano con pulpa blanca, el cual debe de pasar por varias etapas para poder obtener un sabor y aroma similar al chocolate, estos procesos son, recolección del fruto, fermentación del grano y por último el secado del grano, el cacao es conocido por producir chocolate, además, otros productos que se derivan de él son la manteca de cacao y productos cosméticos [12].

Para obtener todos estos productos relacionados con el cacao, la semilla debe de pasar un proceso denominado fermentación, este proceso brinda al producto un sabor y un aroma, normalmente se usa madera sin esencia para no afectar el aroma del cacao, en este proceso se elimina el embrión para que la planta no germine. La fermentación en tipo escalera, comúnmente es conformada por tres cajones, los cuales a la hora de remover los granos su fermentación sea homogénea, se palea de un cajón a otro, así los granos que se encontraban en la parte superior del cajón de madera, al ser paleados a otro cajón, estos se ubicarán en la parte inferior y este mismo resultado se verá con los granos que se encontraban en la parte inferior [12]. En el proceso de fermentación del cacao la temperatura cumple un papel fundamental, dado que esta variable se debe de controlar para que día a día el valor se encuentre en valores predestinados cumpliendo con una fermentación adecuada, durante las primeras 24 horas de haber iniciado el proceso la temperatura debe de estar a 30°C, luego de haber transcurrido 48 horas las bacterias van aumentando y se produce ácido láctico y las bacterias acéticas quedan en condiciones ligeramente más anaeróbicas para entonces se alcanza una temperatura mayor a 40°C, al tercer día la temperatura debe de estar en su punto pico de 50°C y en los próximos días su valor debe de ir bajando, para ello se ve la importancia de la aireación y el volteo del grano del cacao en el proceso. El pH como la temperatura se ve muy ligado con la muerte del embrión, permitiendo la permeabilidad de la testa y el intercambio de sustancias entre el medio y el interior del grano, la humedad del grano debe de ir disminuyendo al pasar los días, iniciando con un pH de la testa y la pulpa del grano entre valores de (3 – 3,5) hasta llegar al día cinco (5) con valores entre (0,5 y 1) de pH. [13]

1.3 LEYES Y NORMAS

A continuación, se presentan las normas y leyes que rigen el cacao a nivel nacional, muestran los parámetros que debe de seguir el agricultor y todos sus aspectos legales, para que así su producto pueda ser considerado en venta a nivel nacional o en su caso a nivel internacional. La primera ley por mencionar es la 101 de 1991 o ley general de desarrollo agropecuario y pesquero, decreta en el capítulo V, artículo 31. Destinación de los recursos. “Los recursos

que se generen por medio de contribuciones para fiscales agropecuarias y pesqueras deben ser invertidos en los subsectores agropecuario o pesquero que los suministra, con sujeción a los objetivos siguientes:

1. Investigación y transferencia de tecnología, asesoría y asistencia técnicas.
2. Adecuación de la producción y control sanitario.
3. Organización y desarrollo de la comercialización.
4. Fomento de las exportación y promoción del consumo
5. Apoyo a la regulación de la oferta y demanda para proteger a los productores contra oscilaciones anormales de los precios y procurarles un ingreso remunerativo.
6. Programas económicos, sociales y de infraestructura para beneficio del subsector respectivo”. (Ley 101 de 1993).

De igual manera se solicita de una licencia cuando el producto sea de exportación, como lo dice el decreto 1000 de 1984. “los exportadores de los granos a que se refiere la Ley 67 de 1983, deberán acreditar el pago del valor de la Cuota de Fomento para obtener licencia de exportación. EL INCOMEX se abstendrá de autorizar cualquier exportación de arroz, cacao, trigo, maíz, cebada, sorgo o avena si no se cumple con el presente requisito.

(decreto 1000 de 1984).

Según la ley 31 de 1965 en el artículo cuatro, nos habla de ayudas a los sectores cacaoteros ya existentes, como se puede ver a continuación: “El cincuenta por ciento (50%) de lo que se recaude en la Sección respectiva por concepto de los dispuesto en esta ley, deberá destinarse para fortalecer las asociaciones cacaoteras ya existentes, o que hayan solicitado la personería jurídica antes del 30 de septiembre de 1963 o a los Comités Cacaoteros que lleguen a organizarse por parte de la Federación y de acuerdo con sus estatutos”.

(ley 31 de 1965).

De igual forma la ley de 1983 tiene como objetivo: “Los recursos de cada fondo se aplicarán a la ejecución o financiamiento de programas de investigación, transferencia de tecnología,

comercialización, apoyo a las exportaciones y estabilización de precios en armonía con las metas políticas trazadas para el sector rural y la actividad agrícola dentro del Plan Nacional de Desarrollo, de manera que se consigan beneficios tanto para los productores como para los consumidores nacionales”.

(Ley 67 de 1983).

La Federación Nacional de Cacaoteros (FEDECACAO) tiene como política de calidad, satisfacer necesidades de la comunidad CACAOTERA mediante el desarrollo de servicios, productos y proyectos para el desarrollo productivo y social del CACAOCULTOR y la protección del medio ambiente.

FEDECACAO se compromete con el bienestar de sus trabajadores, el cumplimiento de los requisitos legales aplicables y la mejora continua del sistema de gestión y sus procesos.

Además, tiene como objetivo general, generar y consolidar procesos de desarrollo agrícola del cacao, que permitan conformar una actividad económica rentable, que conlleven a mejorar las condiciones de vida del gremio cacaocultor y contribuyan al desarrollo tecnológico y a la protección ambiental del sector rural.

CAPÍTULO 2 - SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y LA LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El cacao pasa por diferentes procesos, los cuales aportan a su sabor y aroma tan particular, sus variables a medir son la temperatura y el pH en la etapa de fermentación, en esta circunstancia el cacao tiene que someterse a un ambiente cerrado para que así este adquiriera todas sus propiedades, a continuación, se presentan criterios de selección relacionado a los equipos que ayudan a controlar estos parámetros, para ellos necesitamos conocer más a fondo la importancia que tienen estas variables en el proceso de fermentación del cacao.

Este capítulo hablará sobre los parámetros que influyen directamente en el sabor y aroma del cacao, también se adoptan tecnologías que nos permiten conocer a fondo el proceso de

fermentación del cacao y respectivamente se hará un criterio de selección de estas tecnologías.

2.1 PARÁMETROS QUE INFLUYEN DIRECTAMENTE EN EL SABOR Y AROMA DEL CACAO

La fermentación del cacao consiste en una serie de cambios físico-químicos que generan un cambio en el sabor y aroma del chocolate, estos cambios se ven reflejados en el color de la pigmentación interna, siendo principalmente un color violeta y con el transcurso de la fermentación se torna un color marrón claro, otro cambio que se puede apreciar a nivel químico es la transformación de azúcares en alcoholes por las levaduras, los cuales son convertidos en ácido acético por las bacterias acéticas.

Durante este proceso de fermentación se mantiene una relación muy estrecha y ordenada entre los microorganismos y las variaciones de temperatura, pH y humedad, con la formación de alcoholes ácidos y compuestos polifenológicos, estos eliminan el embrión, disminuyen el sabor amargo del grano y producen las reacciones bioquímicas que forman el chocolate [5].

El proceso de fermentación se inicia con la transformación del azúcar de la pulpa de los granos en alcohol y dióxido de carbono; el pH y la temperatura se elevan, esto se da durante las primeras 24 o 36 horas después de que se haya iniciado el proceso.

La fermentación dura alrededor de 5 días o 120 horas, durante este lapso de tiempo se podrán evidenciar cambios a nivel físico-químico dentro y fuera de los granos de cacao, algunos de ellos son la aparición y eliminación de sustancias polifenólicas. Cabe mencionar que hay especies de cacao que necesitan de más o menos días para su fermentación, por ejemplo: el Cacao Criollo de cotiledón blanco, este cacao requiere de solo tres días de fermentación, mientras, el cacao forastero de cotiledón morado o púrpura necesita de ocho días para su fermentación.

Los factores que influyen en la fermentación del cacao son: los microorganismos, la temperatura y la remoción.

La fermentación se subdivide en tres fases, durante la primera fase actúan las levaduras, en la segunda se desarrollan las bacterias lácticas y en la tercera las bacterias acéticas.

Los primeros microorganismos en aparecer son las levaduras, provenientes de las condiciones iniciales de la pulpa del grano de cacao, como el ambiente anaeróbico y el bajo pH. Las levaduras para poder desarrollarse necesitan de un ambiente de (24 y 48) °C, la mayoría de las levaduras toleran un rango de pH entre (3 y 10), pero prefieren un medio ligeramente ácido con un pH de (4,5 a 6,5).

A 50°C las levaduras dejan de crecer y son reemplazadas por bacterias acéticas, estas aprovechan la aireación y el etanol para poder producir su ácido acético, siendo este un punto cumbre del proceso, dado que el ácido acético provoca una disminución de pH que junto con el calor de la fermentación, acaba con erradicar a los brotes del interior de las semillas, pero no inactiva a las que han sido producidas durante la formación de dichos brotes, además, los microorganismos presentes en la fermentación originan estrés del acetato a partir del ácido acético, esto darán al chocolate su peculiar sabor. Estas bacterias suelen vivir en ambientes con un pH de (5 y 6,5), aunque algunas especies pueden llegar a crecer en un pH cercano a 3.

Se debe de establecer un espacio acorde a la fermentación, este lugar debe de ser un sitio caliente que ayude al aumento de temperatura, donde el viento, la luz ultravioleta y la lluvia no tengan contacto directo con el proceso, si esto llegase a ocurrir, el proceso de fermentación se verá afectado, causando la muerte de microorganismos necesarios para el proceso [5].

El proceso de volteo tiene efecto inmediato de enfriamiento. Liberación de CO₂ y aumento de la aireación de la actividad de las bacterias acéticas, esta actividad tiene como finalidad la fermentación uniforme del grano de cacao.

El volteo se debe de realizar a partir de 48 horas de iniciar la fermentación luego se hará cada 24 horas, durante 2 o 3 días, teniendo muy claro la especie de cacao que se esté fermentando. El volteo se debe de realizar siempre a la misma hora.

Las tres fases que tiene el proceso de fermentación se muestran en la Tabla 1, su duración de tiempo, la temperatura y el nivel de pH son variables de proceso que definen la calidad del grano del cacao.

Fases/Parámetros	Tiempo	Temperatura	pH
Fase 1	2 días.	45°C	Menor a 4,5
Fase 2	Segundo día al cuarto día.	48°C y 51°C	6
Fase 3	Cuarto día en adelante.	48°C y 51°C	7

Tabla 1. Fases del proceso de fermentación (Fuente los autores).

2.2. TIPO DE SENSORES USADOS EN LA ETAPA DE FERMENTACIÓN DEL CACAO

Para el monitoreo de las variables Roberto Delgado en su estudio titulado: “Diseño de fermentador de cacao automático basado en el proceso tradicional” [14], propone el uso de dispositivos electrónicos, para monitorear las variables que influyen en el proceso, los sensores utilizados fueron el sensor de temperatura DS18B20 y el medidor de control del monitoreo del módulo del sensor del regulador de detección del valor líquido PH 0-14 + sonda de electrodo BNC pH.

William Fabián Teneda Llerena, trabajo con una variedad nacional de cacao y el clon CCN51, en su artículo titulado como: “Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao” [15], se puede apreciar los instrumentos de medición que el empleo, en el caso de la temperatura se utilizó un termómetro digital y un cronometro, y se tomaron mediciones desde el inicio de la fermentación y luego dos veces al día hasta haber terminado el proceso, en el caso del pH, se tomó a disposición un pH metro.

El desarrollo del dispositivo de control de temperatura y humedad, para el monitoreo del proceso de fermentación del cacao, se establece principalmente un microcontrolador, este

dispositivo es capaz de recibir toda la información captada por los sensores y partiendo de esto, el usuario podrá corroborar el óptimo funcionamiento del proceso de fermentación, además él debe de enviar la información del proceso por medio de antenas XBee, así logrando establecer un comunicación con un computador, donde se vera de manera gráfica las mediciones captadas por el sensor SI7021 I2C, el cual es un sensor tanto de temperatura como de humedad.

2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la selección de los componentes del sistema de monitoreo, se toma como referencia trabajos de investigación mencionados en el ítem anterior y además se establecen instrumentos consultados por los autores.

2.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

En la tabla 2, se aprecian los dispositivos cuya función es la de supervisar el proceso de fermentación del cacao, estos componentes deben de cumplir con algunas especificaciones que dan contexto al campo que se van a utilizar.

<div> <div>●</div> Relación alta (5) </div> <div> <div>★</div> Relación media (3) </div> <div> <div>▲</div> Relación Baja (1) </div>									
<div> <div>Características</div> <div>Dispositivos</div> </div>	Bajo costo	Dimensiones pequeñas	Bajo consumo	Experiencia con dispositivo	Conexiones simples	Accesibilidad	conectar varios dispositivos	Puerto USB	Total
	●	●	●	●	●	●	★	●	38
	●	●	●	●	★	●	★	▲	32
	▲	▲	▲	★	●	★	●	●	24
	●	●	●	●	●	●	▲	▲	32
	●	●	●	●	●	●	★	●	38

Tabla 2. Cuadro comparativo de dispositivos de control (Fuente los autores).

Se estableció el Arduino UNO debido a la capacidad de integrar varios elementos sin extensiones en sus puertos.

2.3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA

También para el proceso de fermentación del cacao, las variables físicas con mayor importancia son la temperatura y pH. A continuación, se muestra en la tabla 3, un diagrama para la selección de los sensores de temperatura usando criterios de ingeniería y cuál de ellos se adecua al proyecto.

		<div><div><div></div> Relación alta (5)</div><div><div>★</div> Relación media (3)</div><div><div>▲</div> Relación Baja (1)</div></div>										
Características	Dispositivos	Bajo costo	Dimensiones pequeñas	Bajo consumo	Experiencia con dispositivo	Conexiones simples	Accesibilidad	Digital	Sumergible	Adaptable con Arduino	Temperatura (45-48)°C	Total
	PT-100	★	★	●	★	★	●	▲	★	●	●	36
	Termometro digital	★	★	●	★	★	●	▲	●	▲	●	36
	DS18B20	●	★	●	★	★	●	▲	●	●	●	40
	SI7021 I2C	●	●	●	★	●	●	●	▲	●	●	44

Tabla 3.Cuadro comparativo de sensores de temperatura. (Fuente los autores).

En vista de que es posible utilizar un solo dispositivo electrónico para medir estas variables temperatura y humedad, se seleccionó el sensor SI7021 i2C, fuera de su reducido tamaño, este dispositivo ocupa un espacio mínimo en el cajón de fermentación del cacao, el sensor va a estar al interior del cajón para establecer una medición constante de la temperatura y humedad.

2.3.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE PH

Para la selección de sensor de pH, se tuvieron en cuenta las siguientes características, como lo muestra la tabla 4.

●	Relación alta (5)
★	Relación media (3)
▲	Relación Baja (1)

Características Dispositivos	Bajo costo	Dimensiones pequeñas	Bajo consumo	Experiencia con dispositivo	Conexiones simples	Accesibilidad	Adapte con el Arduino	pH (4,5 - 7)	Total
Medidor de pH analogico V2	▲	●	●	★	●	★	●	●	32
Medidor digital de pH	●	★	●	●	●	●	▲	●	32
Sensor de Ph E201-BNC + Modulo controlador pH-4502C	★	●	●	★	●	★	●	●	34

Tabla 4. Cuadro comparativo de sensores de pH. (fuente los autores).

El dispositivo XBee S2C tiene un rango de cobertura de transmisión de datos de 1200 metros al aire libre, por lo cual, este dispositivo tiene un rango amplio para transmitir datos desde el sensor a otro dispositivo electrónico, además es XBee puede adaptarse para ser conectado por medio del puerto USB de un computador, resultando así beneficioso para establecer una interfaz básica y ser mostrada en pantalla.

2.4 INSTRUMENTOS Y EQUIPOS A UTILIZAR

Partiendo de los criterios de selección, se obtuvieron los equipos que conformaran el sistema de medición del proceso de fermentación del cacao.

2.4.1 ARDUINO UNO

El Arduino UNO es una tarjeta electrónica programable, la cual, su uso se desempeña de manera didáctica, su uso es rápido debido a que sus ajustes se realizan por medio de USB, esto quiere decir que cualquier problema que se tenga con programación solo es ajustar el código y por medio de un cable USB pasarlo al Arduino. (Véase en la figura 1), a continuación, en la tabla 5 se presentan sus características técnicas.

Arduino UNO
Microcontrolador AT-Mega 328.
14 pines de entrada digital.
6 pines de entrada analógica.
Resonador cerámico de: 16 MHz.
Conector tipo USB hembra.
Tensión de operativo: 5 V.
Tensión de entrada: (7-12) V.
Memoria Flash: 32 KB.
EEPROM: 1KB.
Velocidad de reloj de:16 MHz.
Botón de RESET.

Tabla 5. Características técnicas del Arduino UNO. (Fuente los autores).

Estas características resultan importantes en el sistema de medición de cacao, debido a que voltaje de operación están en el rango que el panel solar pueda suministrar alimentación eléctrica, también su conector tipo hembra USB facilita la conexión del panel solar con el Arduino UNO y, por último, su memoria flash está en la capacidad de recibir los datos y entregarlos.

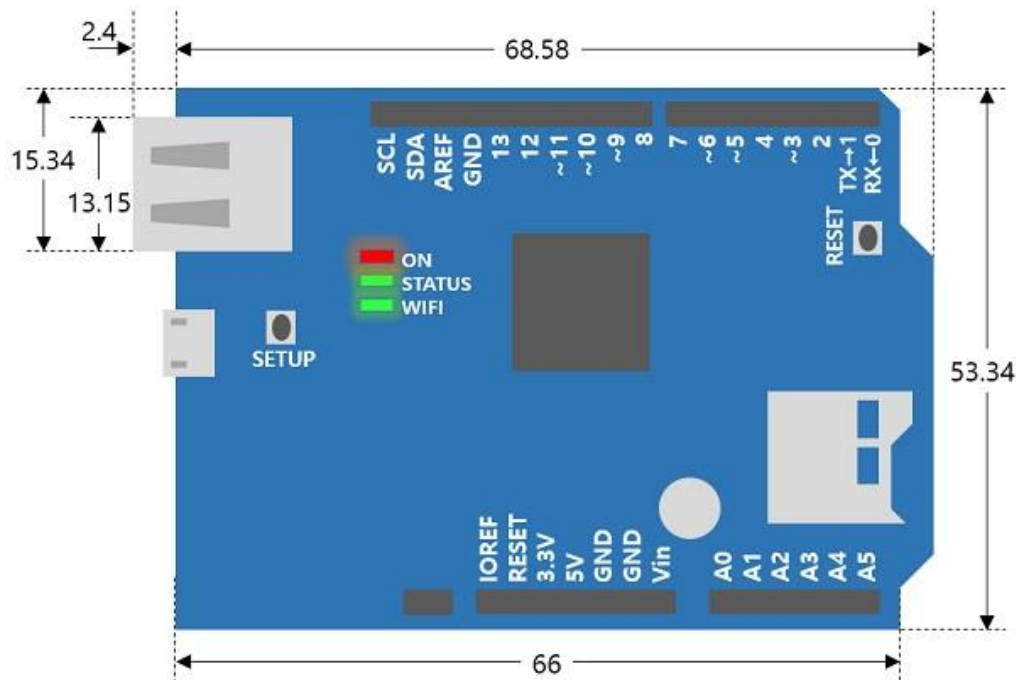


Figura 1. Arduino UNO. (Fuente www.phpoc.com)

Este dispositivo es el encargado de ordenar todas las funciones del sistema de medición, controla y da funciones a los sensores y al XBee, es muy importante su labor, debido a que sin el todo este proceso no tendría pautas para ejecutarse, también por medio de este dispositivo brindamos de alimentación eléctrica a los componentes que se encuentran conectados a él.

2.4.2 SENSOR SI7021 I2C

El sensor de humedad y temperatura Si7021 I2C (véase figura 2), es un monolítico CMOS IC que integra elementos de sensor de humedad y temperatura, un convertidor analógico/digital, procesamiento de señal, datos de calibración y una interfaz I2C, Además el sensor SI7021 trae consigo librerías para ser utilizado con Arduino, facilitando así su programación y conexión. A continuación, en la tabla 6, se presentan los datos técnicos del sensor SI7021 i2C.

Sensor SI7021 I2C
Sensor de humedad relativa ± 3 % de: (0 a 80) %
Sensor de temperatura de $\pm 0,4$ de: (-10 a +85) °C
Rango de operación: (0 a 100) % RH
Rango de funcionamiento: (-40 a +125) °C
Tensión de operación: (1,9 a 3,6) V
Bajo consumo de energía 150 μ A corriente activa
Corriente de reserva de: 60 nA

Tabla 6. Características de SI7021 I2C. (Fuente los autores).



Figura 2. Sensor SI7021 i2C (Fuente yorobotics.co)

La correcta conexión del sensor SI7021 i2C con el Arduino UNO, se puede apreciar en la Figura 3, la cual muestra cómo se conecta GND del SI7021 i2C al GND del Arduino UNO, representado por la línea negra, el positivo del sensor Vcc se conecta al pin de 3.3V del Arduino UNO, ilustrado como la línea roja, las línea azul y verde son SDA y SCL del Arduino UNO y se conectan al SDA y SCL del sensor SI7021 respectivamente.

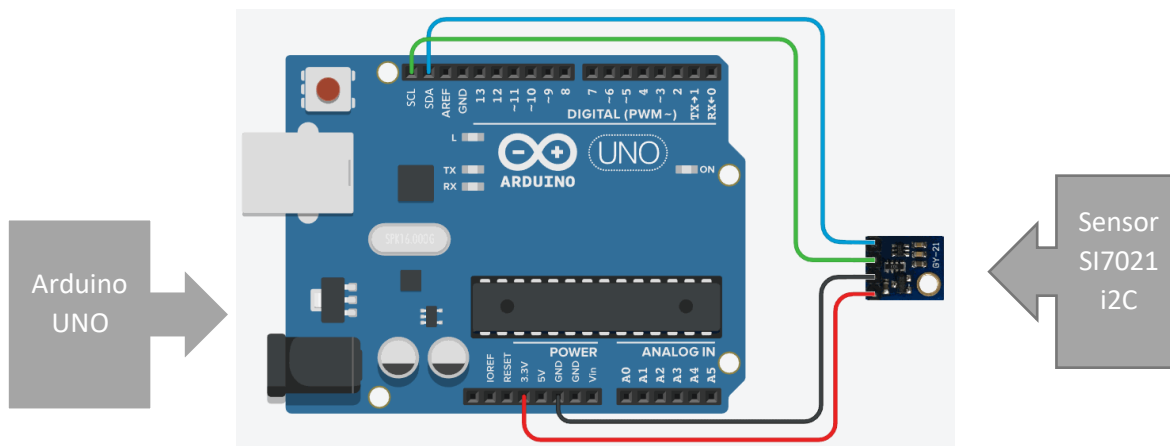


Figura 3. Conexión del Arduino UNO con el sensor SI7021 i2C (Fuente idyl.io/Arduino).

El sensor SI7021 es un sensor de temperatura y humedad, tiene como función en el proyecto medir dichas variables y por medio del Arduino UNO convertir esos datos en información legible por el usuario, de esta manera el usuario puede comparar el proceso con uno ideal, y así establecer resultados a futuro con lo que él está desarrollando.

2.4.3 SENSOR DE PH E201-BNC + MODULO CONTROLADOR PH-4502C

El sensor de pH E201-BNC más el módulo controlador pH-45020 (véase en figura 4), es un dispositivo que cumple con la función de medir pH con ayuda de un electrodo, este instrumento es compatible con tecnologías TTL como lo es Arduino, cuenta con un potenciómetro offset el cual ayuda a calibrar la medición de pH, mientras que otro potenciómetro controla la salida digital, también cuenta con una salida analógica la cual se puede conectar directamente al Arduino, por lo cual no es necesario el uso de librerías para poder utilizarlo. Sus características se presentan a continuación en la tabla 7.

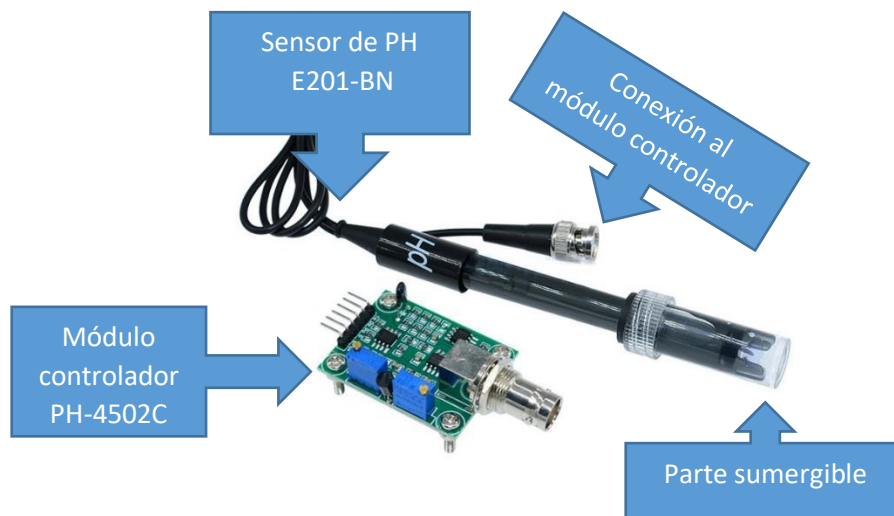


Figura 4. Sensor de pH E201-BNC + Modulo controlador pH-4502C (Fuente cdmxelectronica.com)

pH-4502C y pH E-201-BNC
Tensión de calentamiento: 2 V
Corriente de trabajo: (5-10) mA
Rango de concentración de detección pH: (0-14)
Rango de detección de temperatura: (0 - +80) °C
Tiempo de respuesta: 5 s
Tiempo de estabilidad: 60 s
Consumo de energia: 0,5 W
Temperatura de funcionamiento: (-10 a +50) °C

Tabla 7. Características del sensor de pH. (fuente los autores).

El sensor de Sensor de PH E201-BNC y Modulo Controlador PH-4502C, son los encargados de medir el pH que se encuentra en el sistema de fermentación del cacao, con ayuda del Arduino UNO trasforman cada dato que ellos captan a información que el usuario pueda comprender, y saber si su proceso está en el camino adecuado.

2.3.5 XBEE S2CTH

El módulo de XBee S2CTH ZigBee con antena de cable. (véase en figura 5), Mejora la potencia de transmisión y el protocolo de datos, estos módulos permiten una comunicación

no cableada muy confiable entre microcontroladores, computadoras, entre otros dispositivos electrónicos.

Este módulo consta de un mapa de pin uniforme con otros móduloXBee, lo cual da como beneficio el poder conectarlo en el blindaje Arduino XBee estándar, como módulo shield XBee ZigBee para Arduino. A continuación, en la tabla 8 se muestran las características técnicas del XBee S2C.

Xbee S2CTH
Velocidad de datos RF 250 Kbps
Rango interior 60 m
Alcance al aire libre 1200 m
Potencia de transmisión 3,1 mW
Temperatura de funcionamiento (-40 a +85) °C
Banda de frecuencia ISM 2,4G Hz
Sensibilidad del receptor -100 dBm

Tabla 8. Características del XBee S2C. (Fuente los autores).



Figura 5. XBee S2CTH (Fuente Ardobot).

La conexión del XBee y el Arduino UNO se puede apreciar en la figura 6, la línea roja significa 3.3V y va del pin 1 del XBee a 3.3V del Arduino UNO, la línea negra es GND de

ambos dispositivos, el pin 2 del XBee Dout va conectado al RX del Arduino UNO y Din que se encuentra en el pin 3 del XBee va conectado al TX del Arduino UNO.

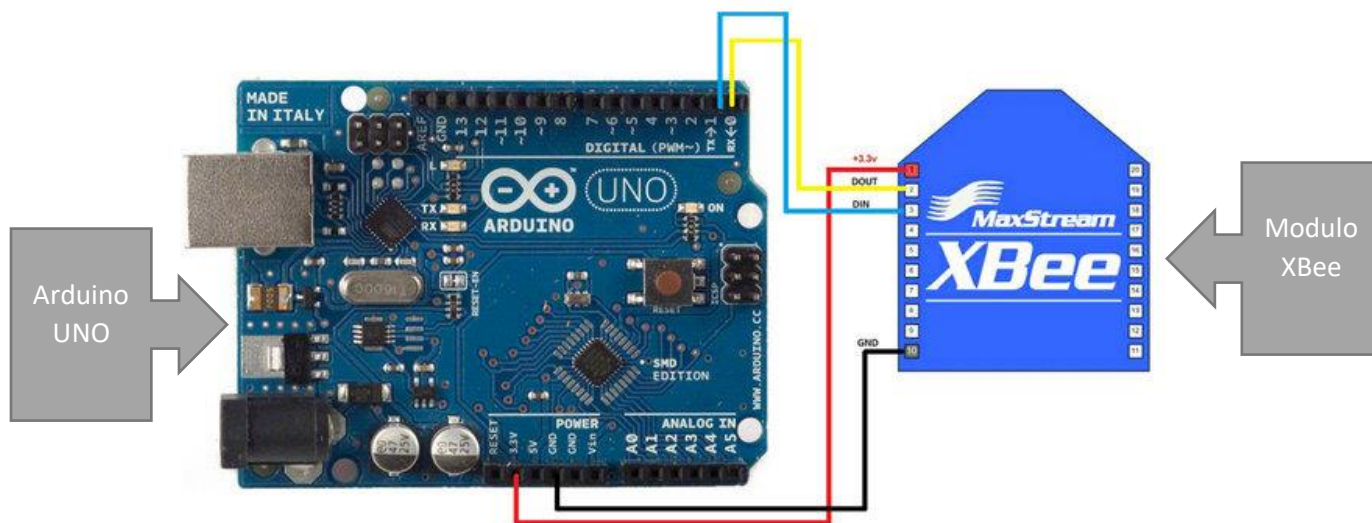


Figura 6. Conexión del XBee con el Arduino UNO. (Fuente Forum.arduino.cc)

El XBee S2CTH es el encargado de transmitir los datos desde el sistema de medición de fermentación del cacao a un computador, allí el usuario tendrá la capacidad de observar los parámetros que son captados por los sensores y partiendo de esto, él podrá tomar decisiones con respecto a la fermentación del cacao y si se está cumpliendo con todos los criterios para tener una óptima fermentación

2.3.6 MODULO CARGADOR BATERÍA DE LIPO 1A MICRO USB- 5V – TP4056

Es un minúsculo dispositivo electrónico perfecto para la carga de baterías lipo o Li-ion de una sola celda de 3.7V, este elemento circuito electrónico está basado en el chip TP4056 de protección de batería DW01, este módulo ofrecerá una corriente de carga de 1A y cortará su carga cuando las baterías se encuentren cargadas completamente. (Véase en la figura 7). Todo este proceso se puede apreciar cuando el dispositivo este trabajando en la noche, durante el día el módulo TP4056 cumple con la función de cargar las baterías con la energía restante que no está siendo ocupada por el sistema de medición de fermentación del cacao, así que en el día estará cargando baterías y el sistema de medición estará trabajando con la energía del panel solar.

Además, cuando el voltaje de la batería cae por debajo de 2.4V, el chip de protección desconecta la carga para así proteger la celda de funcionar a una tensión demasiado baja y proteger la conexión de sobretensión y polaridad inversa.

Algunas de sus características son: módulo de carga lineal, corriente de 1A ajustable, precisión de carga de 1.5%, voltaje de entrada 4.5V – 5.5V, voltaje full de carga 4.2V, LEDs indicadores de carga. Micro USB, temperatura de trabajo -10°C a +85°C, tamaño 25 x 19 x 10 mm.

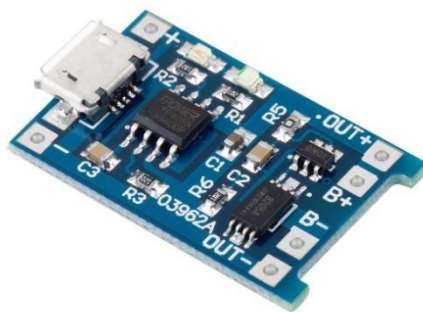


Figura 7. Módulo TP4056 (Fuente zamux.co).

2.3.7 MODULO ELEVADOR DE VOLTAJE 5V USB, CONVERTOR DC-DC 0.9V A 5V

Fuente de alimentación móvil, capaz de generar un voltaje de 5V a la salida, ideal para el uso de baterías litio, este módulo puede generar directamente un voltaje de 5V. algunas características son: corriente máxima de salida 1000mA, corriente de trabajo 500 – 700 mA, entrada de 2.8V – 3V, salida USB estándar 3.3 – 9V, voltaje ajustable 0.5% LEDs de referencia de carga y un tamaño de 33 x 18 x 11 mm. (Véase en la figura 8).

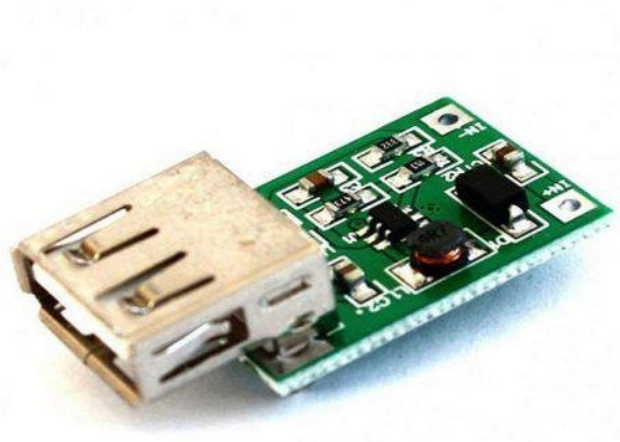


Figura 8. Modulo elevador 5V USB (Fuente www.didacticaselectronicas.com)

Se establecieron dos circuitos con el fin de controlar el proceso de fermentación del cacao, los circuitos van a estar alimentados con energía solar en las mañanas y cuando las horas pico solares no estén unas baterías Lipo recargables harán la labor de producir energía eléctrica. Por medio de este módulo elevador USB, el circuito siempre tendrá un voltaje constante de 5v, así evitando daños por sobrecarga en los componentes del sistema de medición.

2.4 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE FERMENTACIÓN DEL CACAO

El diseño electrónico del sistema se divide en diferentes etapas, partiendo con los criterios de selección de los componentes electrónicos, por consiguiente, se seleccionan los instrumentos que conformaran el sistema de medición del proceso de fermentación del cacao, a continuación, se presentan la fase de construcción del diseño electrónico por medio del software EAGLE.

El circuito inicia con la parte de regulación del panel solar, para esto se utilizó el módulo TP4056, el cual cumple también con la función de cargar las baterías, y para que la entrada del circuito sea de 5V constantes, se dispuso a usar un Boost Converter USB. Para esto se

tiene la alimentación del circuito electrónico por medio de dos borneras, también se implementaron borneras para la carga de las baterías. La tarjeta electrónica se diseñó en el software EAGLE como se puede apreciar en la siguiente figura 9.

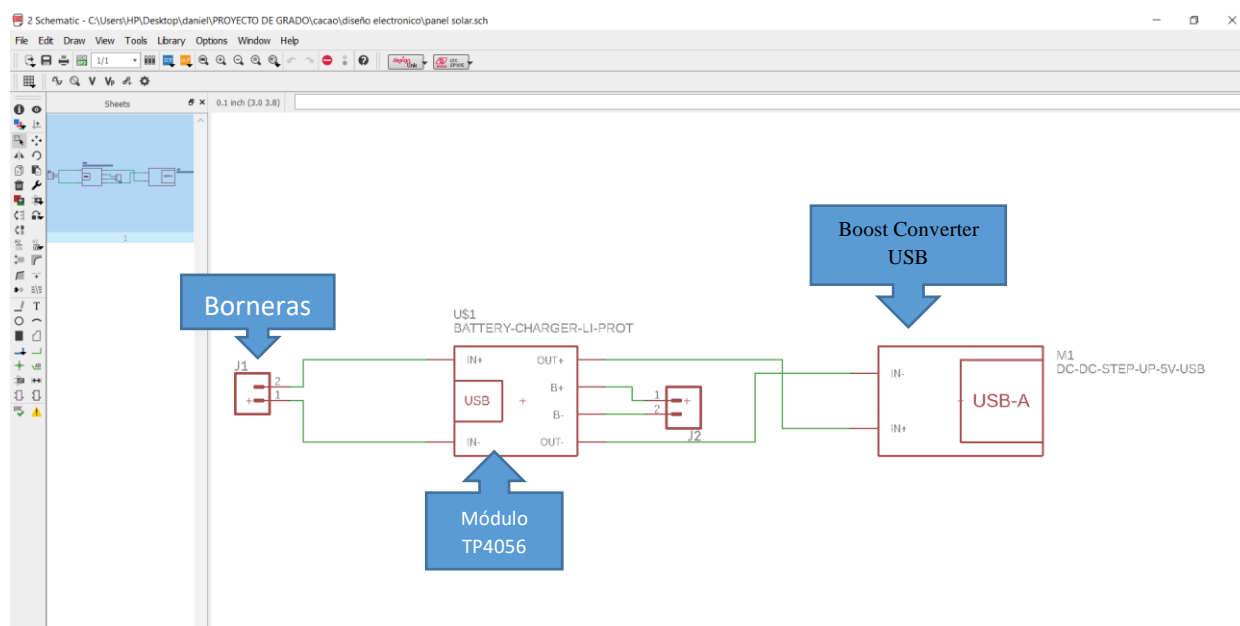


Figura 9. Esquemático del circuito de regulación y carga de baterías. (Fuente los autores).

El siguiente circuito está conformado principalmente por el Arduino UNO, el sensor de temperatura y humedad SI7021 i2C, y su dispositivo de comunicación inalámbrica XBee S2C (Figura 10), el cual tiene como función de tomar las variables físicas del proceso (temperatura y humedad), esta información será llevada al Arduino UNO el cual cumple con la función de transformar esa información en datos que sean comprendidos por el usuario y posteriormente el Arduino UNO, por medio del XBee S2C enviara esta información a un computador, en donde se visualizara el valor de cada una de las variables y así el usuario podrá confirmar que su proceso se está rigiendo con todos los parámetros establecidos para una buena fermentación del cacao.

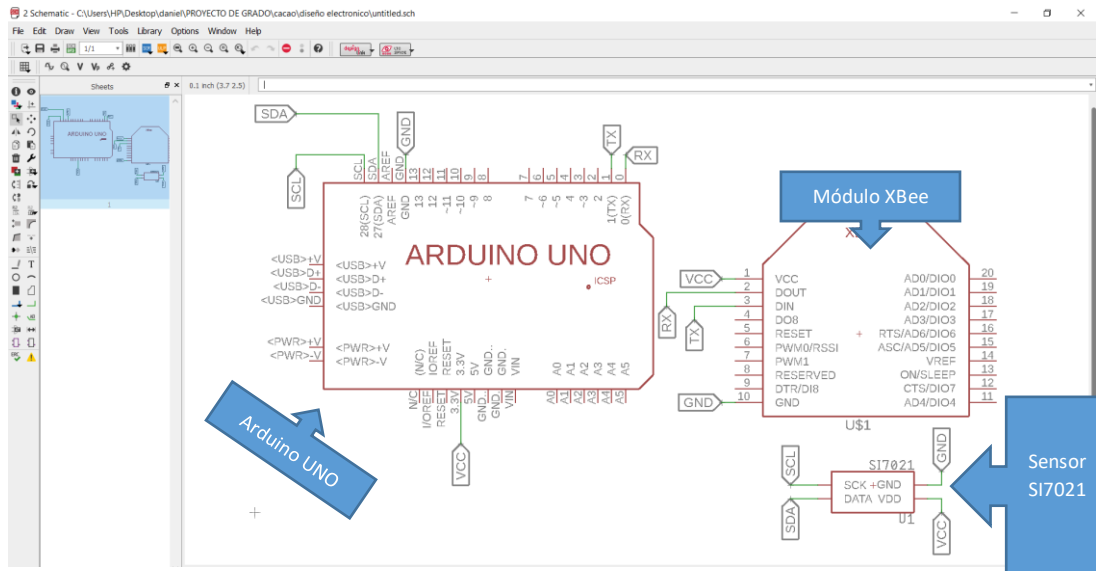


Figura 10. Esquemático del circuito de control (Fuente los autores).

En la figura 11, se aprecia un mapa de conexiones de todos los elementos que conforman el sistema de medición de fermentación del grano de cacao. En la primera parte se puede apreciar los elementos de alimentación eléctrica del circuito, siendo el panel solar, módulo TP4056, baterías recargables y el boost converter USB, siguiente a estos elementos se observa el Arduino UNO, como elemento de procesamiento de datos, a ellos van conectados los sensores de temperatura, humedad y PH, los cuales son los encargados de tomar datos del sistema y enviarlas al Arduino, el módulo XBee es el elemento de transmisión de datos a la computadora, donde el usuario podrá apreciar todo lo relacionado con el proceso.

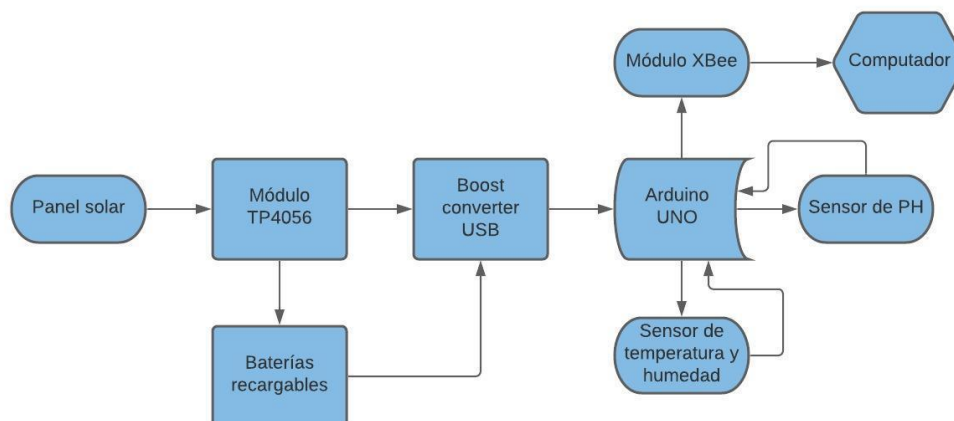


Figura 11. Mapa de conexiones. (Fuente los autores).

2.4.1 CÁLCULOS TEÓRICOS DEL PANEL SOLAR

El sistema de alimentación del circuito es basado en el uso de paneles fotovoltaicos, a continuación, se presentan los cálculos teóricos para la selección del panel y las baterías.

Para la selección del panel solar se tiene en cuenta aspectos relacionados con potencias de los dispositivos electrónicos involucrados, cada dispositivo tiene su modo de operación y modo reposo, lo cual esto significara un gasto de energía al día, basado en esto datos se inicia para la selección del panel solar.

Para obtener las potencias de los dispositivos, se verifica en su ficha técnica el modo standby y en modo transmisión, estas corrientes se multiplican por el voltaje de operación de cada componente, Como se aprecia en la ecuación 1.

Para el XBee (1)

$$3,3V * 40mA = 132mW \text{ modo transmisión}$$

$$3,3V * 1\mu A = 3,3\mu W \text{ modo standby}$$

Para el sensor SI7021 i2C

$$3,3V * 150\mu A = 495\mu W \text{ modo de transmisión}$$

$$3,3V * 60nA = 198nW \text{ modo standby}$$

Para el sensor de pH.

$$potencia = 0,5W$$

El siguiente paso por realizar es tener en cuenta el tiempo el cual se desarrollan dichas potencias, si un día está comprendido por 1440 minutos, además el sensor va a tomar mediciones cada 30 minutos, por ende, cada 30 minutos se hará la transmisión, con respecto a una hora 48s son 3600. Como se aprecia en la ecuación 2.

$$\frac{7600s}{3600s} = 2 \text{ (2)}$$

De esta manera se obtienen 2 horas al día, el cual, el sensor tomara mediciones, este cálculo tiene la función de conocer cuántas intervenciones tiene el sensor con respecto a las horas al día.

La energía consumida se puede hallar con la multiplicación de la potencia desarrollada y el tiempo en que se desarrolla. Como se aprecia en la ecuación 3 y 4.

Para el XBee

$$132mW * 2h = 264mWh \text{ (3)}$$

$$3,3\mu W * 22h = 72\mu Wh$$

Para el sensor SI7021 i2C

$$495\mu W * 2h = 990\mu Wh \text{ (4)}$$

$$198nW * 22h = 4356nWh$$

Luego, se suman las energías de cada elemento y así obtener la energía total del sistema, como se puede apreciar en la ecuación 5.

$$5,52Wh + 264,07mWh + 994,356\mu Wh + 0,5Wh = 6,28 Wh \text{ (5)}$$

Siendo 5,52Wh el consumo del Arduino UNO , 264,07mWh el consumo del XBee y 11,183uWh el consumo del SI7021 i2C y 0,5Wh del sensor de Ph.

Para obtener la potencia consumida por hora del equipo se divide la energía total del sistema por 24 horas, siendo este resultado un valor que suele ser solicitado por los fabricantes de paneles solares, véase en la ecuación 6.

$$\frac{6.28Wh}{24h} = \frac{261,667mWh}{h} \text{ (6)}$$

Para la selección del panel solar, se divide la energía total por el número de horas pico solares de la región, este valor corresponde a la ubicación donde se instala el sistema de medición. Se puede apreciar en la ecuación 7.

$$\frac{6.28Wh}{3h} = 2,1W \quad (7)$$

Siendo 3 horas, una información correspondiente a la actividad solar con respecto al centro del país.

Con respecto a este resultado se obtiene la potencia del panel solar, siendo de 2W.

Para conocer el número paneles solares que se necesitan para una instalación fotovoltaica se considera la ecuación 8.

$$N_{PANELES} = \frac{E_{TOTAL}}{HPS * P_{PANEL}} \quad (8)$$

$N_{PANELES}$ = Número de paneles

E_{TOTAL} = Energía total del sistema

HPS = Horas pico solares

P_{PANEL} = Potencia del panel a usar

2.4.2 BATERÍA

Es un elemento capaz de almacenar energía y descargarse cuando el circuito lo necesite, en las mañanas para la alimentación del sistema de medición de temperatura y humedad, este será alimentado eléctricamente por medio de la celda solar, pero en las noches dada la ausencia de luz solar el circuito deberá extraer energía eléctrica de otra fuente, ahí es donde las baterías entran su funcionamiento, se desarrolló el cálculo de la capacidad de la batería de la siguiente forma.

2.4.3 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA

Se obtiene la capacidad de la batería de la siguiente manera. Véase en la ecuación 9.

$$C = \frac{E_T * D_T}{P_D * T_T} \quad (9)$$

Siendo:

C = Capacidad de la batería

E_T = Energía total por día

D_T = Días de autonomía

P_D = Profundidad de descarga de la batería

T_T = Tensión de trabajo

CAPÍTULO 3 - INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL MONITOREO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN

En este capítulo se brinda información sobre la interfaz básica del sistema de medición de la etapa de fermentación del cacao, se explica las funciones del software de y que facilidades aporta al programador y, por último, también se presenta imágenes alusivas al programa que se desarrolló.

3.1 SOFTWARE PARA LA CREACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, MONITOREO Y CONTROL

Para la elaboración del sistema de monitoreo y control se desarrolló en el Software LabVIEW, este programa brinda facilidades en cuanto a la programación basada en bloques, reduciendo las líneas de código y por ende transforma la programación a una manera más didáctica.

El software trae librerías para la plataforma Arduino, lo cual incluyen todos los sensores de esta familia, así el usuario podrá hacer uso de diferentes sensores que son comunes en el mercado.

El programa se desarrolla en dos ventanas, siendo una la ventana de bloques y la otra una ventana visualizadora del proceso, por ejemplo, se tienen termómetros, indicadores, valores numéricos, graficas, entre otros; y en la ventana de bloques irían todos los componentes que dan forma al circuito electrónico, por ejemplo, sensores, actuadores, señales, ciclos de programación, entre otros.

LabVIEW también brinda la facilidad de hacer conexiones con Xbee, esta función cumple con el propósito de realizar una interfaz básica entre las mediciones que haga el sensor en el campo de trabajo y puedan ser vistas por usuario desde la comodidad de un computador, por ende toda la información captada por un microcontrolador, y sea enviada por un dispositivo transmisor, el receptor puede estar conectado a un puerto USB de un computador y desde allí será visto por cualquiera que tenga acceso a este equipo de cómputo.

3.2 DISEÑAR LA INTERFAZ ENTRE EL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL Y EL USUARIO, TENIENDO EN CUENTA LAS NECESIDADES DEL PROCESO.

El programa LabVIEW tiene el fin de desarrollar el sistema visualizador de datos, en la ventana de bloques figura 12 se puede observar un ciclo while y los bloques referentes al control del sensor de pH, sensor de temperatura y humedad.

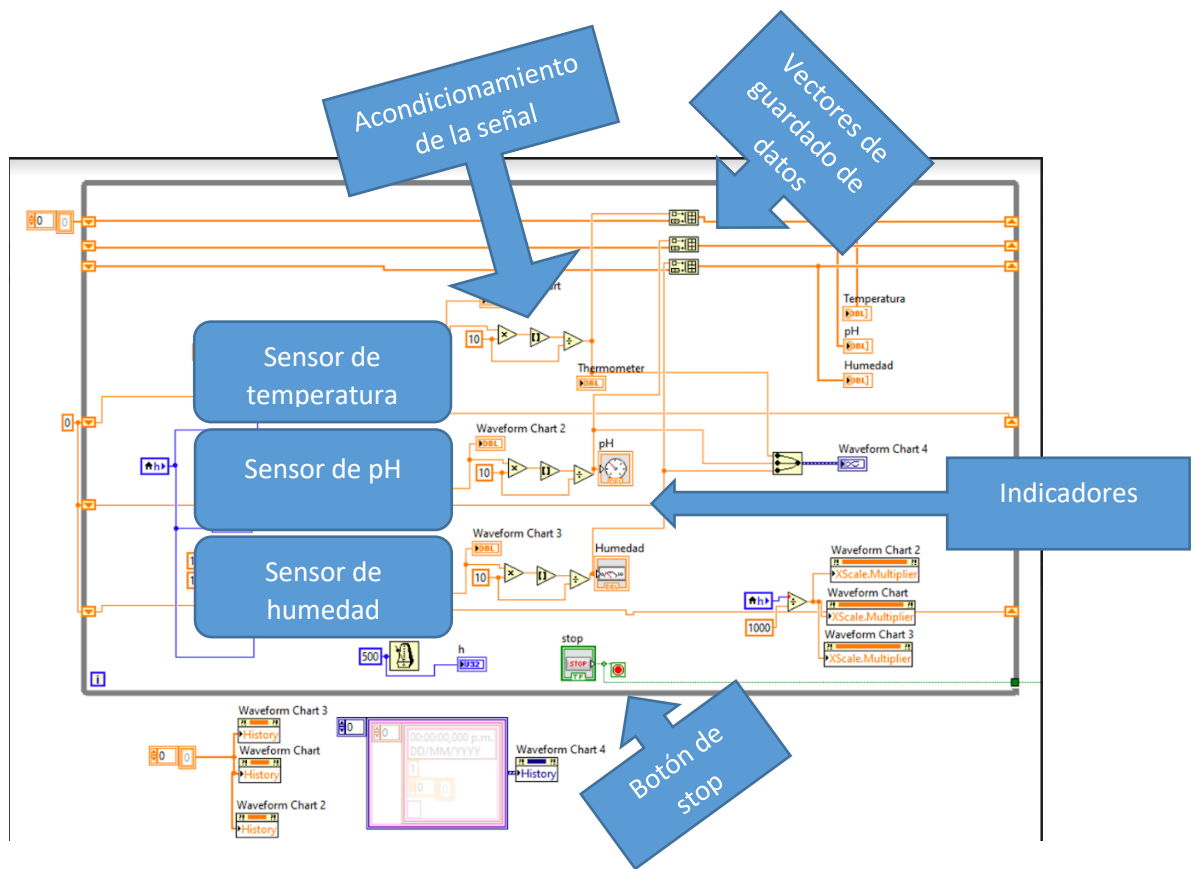


Figura 12. Diagrama de bloques (Fuente los autores).

Como se presentó en la figura 12, se puede evidenciar el funcionamiento del sistema de medición del proceso de fermentación del cacao, se muestran bloques de lectura de pines, conversores, indicadores e ilustradores. Para la exportar datos de labview a Excel (véase en la figura 13), se utiliza el bloque Write To Measurement File, este bloque es el encargado del guardado de datos recolectados por los sensores y de esta manera ser exportados a Excel.

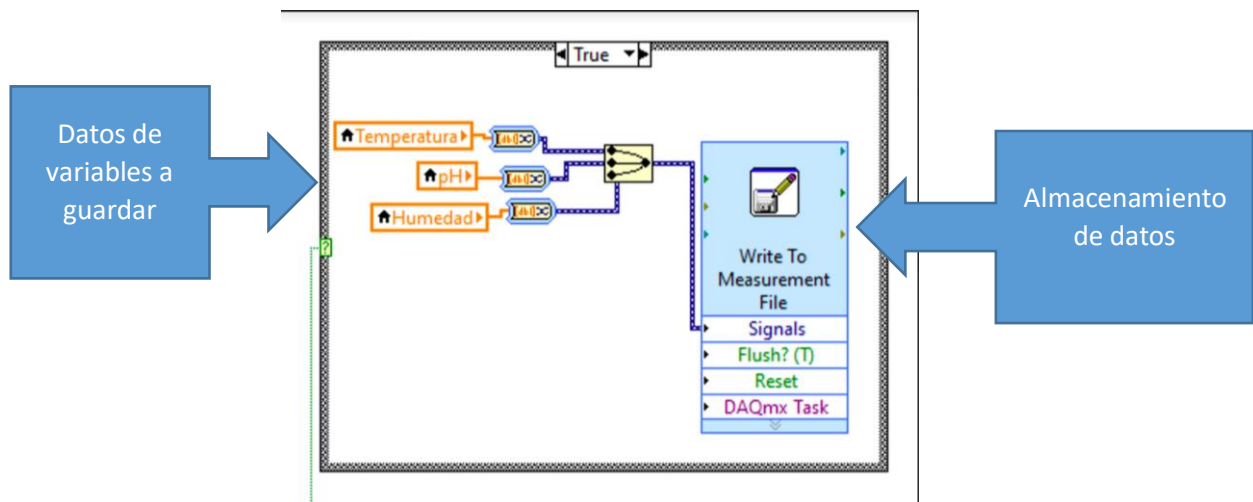


Figura 13. Transmisión de datos de LabVIEW a Excel. (Fuente los autores).

CAPÍTULO 4 - DISEÑO EN CAD DEL SISTEMA PARA PROCESO DE FERMENTACIÓN TIPO ESCALERA

Este capítulo contiene información alusiva a la carcasa protectora que cubrirá al circuito de medición, teniendo soportes para que cada componente quede fijo y estable el lugar deseado, la carcasa fue diseñada en el Software Autodesk Inventor.

4.1 DISEÑO EN CAD EL PROCESO DE FERMENTACIÓN TIPO ESCALERA DEL CACAO, EL CUAL CONTENGA LA UBICACIÓN DE LOS SENSORES.

A continuación, en la figura 14 se podrá apreciar un diseño con las dimensiones que posee la caja donde se depositará el cacao, cabe resaltar que al ser un proceso tipo escalera el número de cajas puede variar, para este caso se mostrará el diseño de una sola caja.

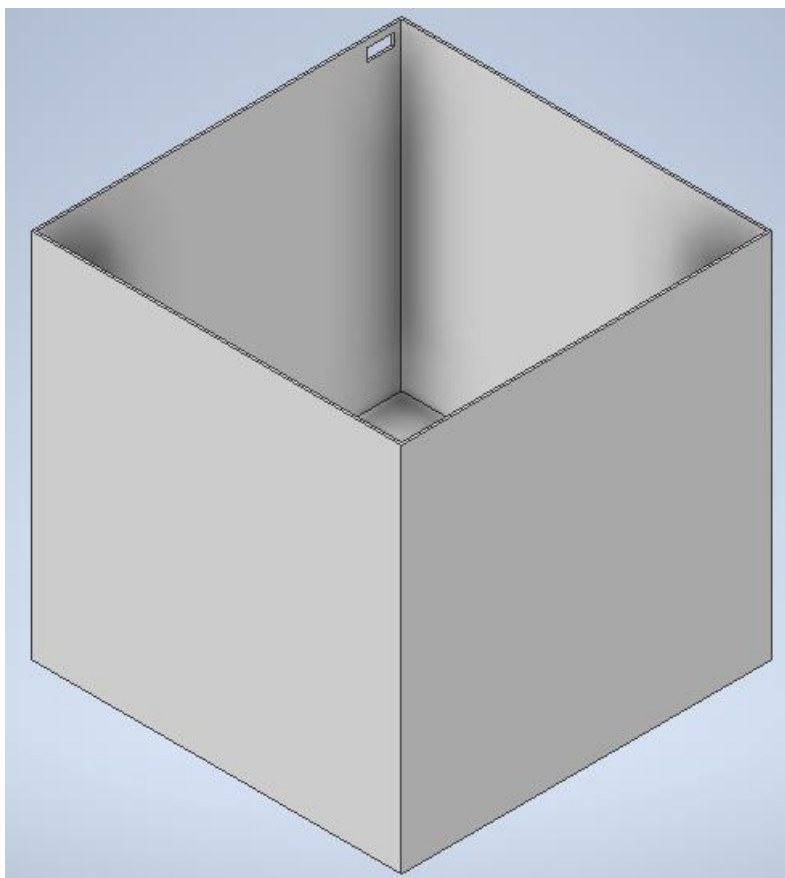


Figura 14. Caja para fermentación de cacao. (Fuente los autores).

En este caso, la caja no será totalmente cerrada debido a que para que su proceso sea optimo este será cerrado con hojas de las plantas de plátano, además como se nota en la imagen en la parte superior irá ubicada la caja con los circuitos electrónicos.

En la figura 15 se puede observar los planos con las dimensiones en mm que posee la caja donde se realizara el proceso de fermentación del cacao.

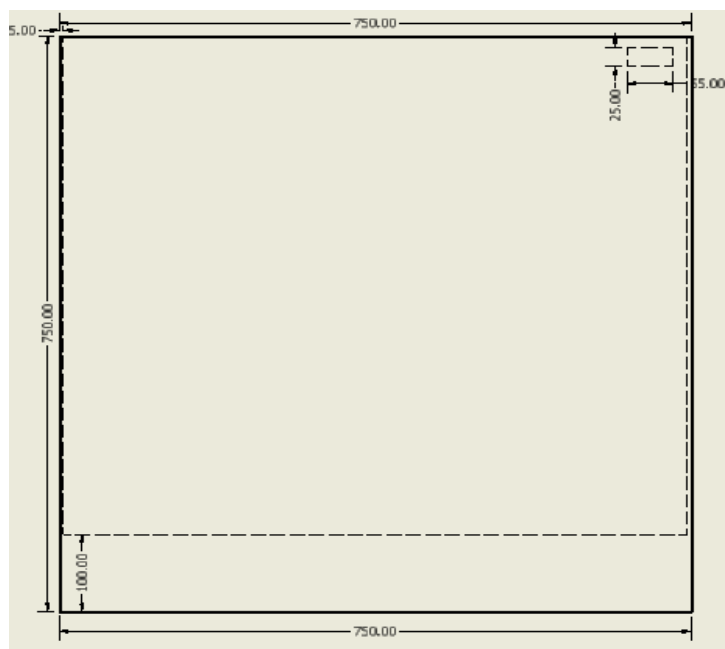


Figura 15. Planos de caja para fermentación de cacao. (Fuente los autores).

A continuación, se expondrá la caja protectora de los circuitos electrónicos con los cuales contara el proyecto, son dos circuitos electrónicos con lo cual serán dos cajas totalmente aparte, cada caja constara de dos partes. Más adelante se explicará la distribución de cada parte de la caja, junto sus dimensiones.

En la figura 16 se muestra la primera parte de la caja uno, que llevara las baterías y boostconverter, todas las dimensiones que posee esta parte de la caja fueron adquiridas mediante el software Eagle que nos brinda las medidas para hacer los soportes y hacer que el circuito se encuentre seguro ante cualquier movimiento.

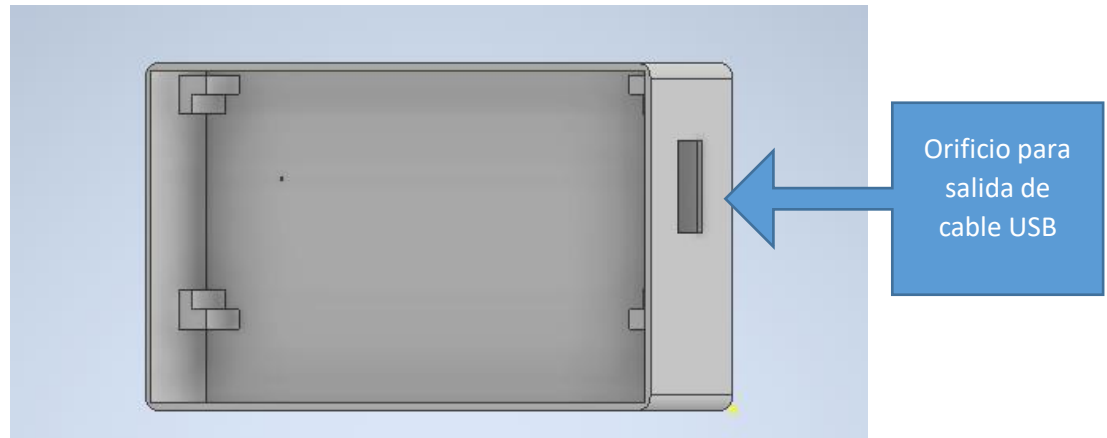


Figura 16. Caja uno, parte uno. (Fuente los autores).

En la figura 17 se muestra los planos con todas las medidas de manera detallada, donde se ve la dimensión total de la caja, el tamaño de los soportes de la tarjeta y la ranura para la conexión del cable USB.

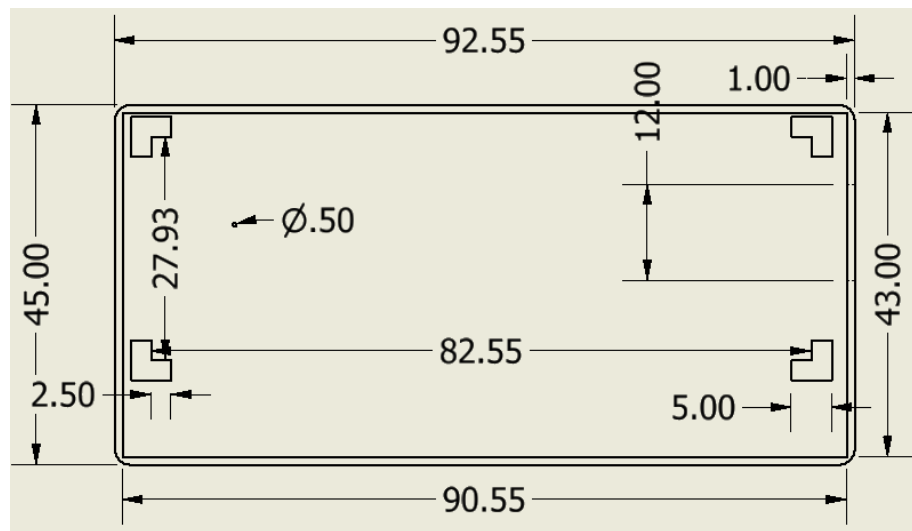


Figura 17. Planos caja uno, parte uno. (Fuente los autores).

Para la segunda parte de la caja, serán ubicadas las baterías que ayudarán al funcionamiento autónomo del circuito, para esta parte se realiza el soporte para dos baterías del tamaño de una batería AA, esto se podrá ver con más claridad en la figura 18.

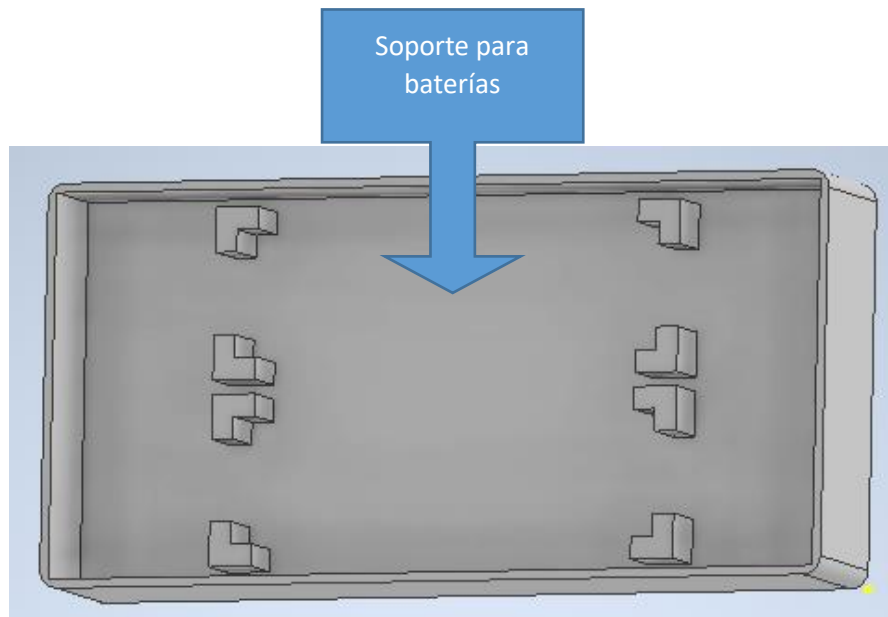


Figura 16. Caja uno, parte dos. (Fuente los autores).

En la figura 19 se muestra los planos donde se ven las dimensiones de los soportes, la distancia que muestra el tamaño de cada batería y la dimensión total de la caja que ensambla de manera perfecta con la otra parte.

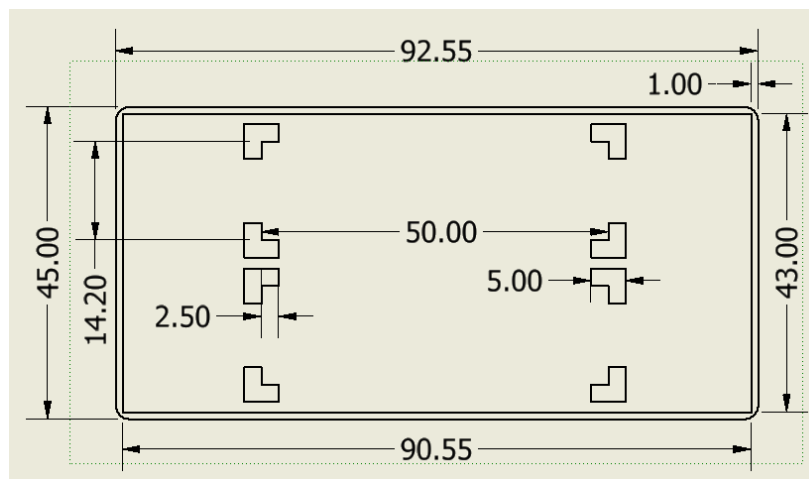


Figura 17. Planos caja uno, parte dos. (Fuente los autores).

La segunda caja como se mencionó anteriormente cuenta también con dos partes, en la primera será instalado en los soportes el Arduino, también cuenta con varios orificios donde van los cables USB y poder del Arduino además habrá dos orificios donde serán ubicado los sensores que están en contacto con el cacao para calcular su humedad, temperatura y pH. En

la figura 20 se muestra el diseño realizado en inventor y dará claridad de cómo quedará construido la primera parte de la caja.

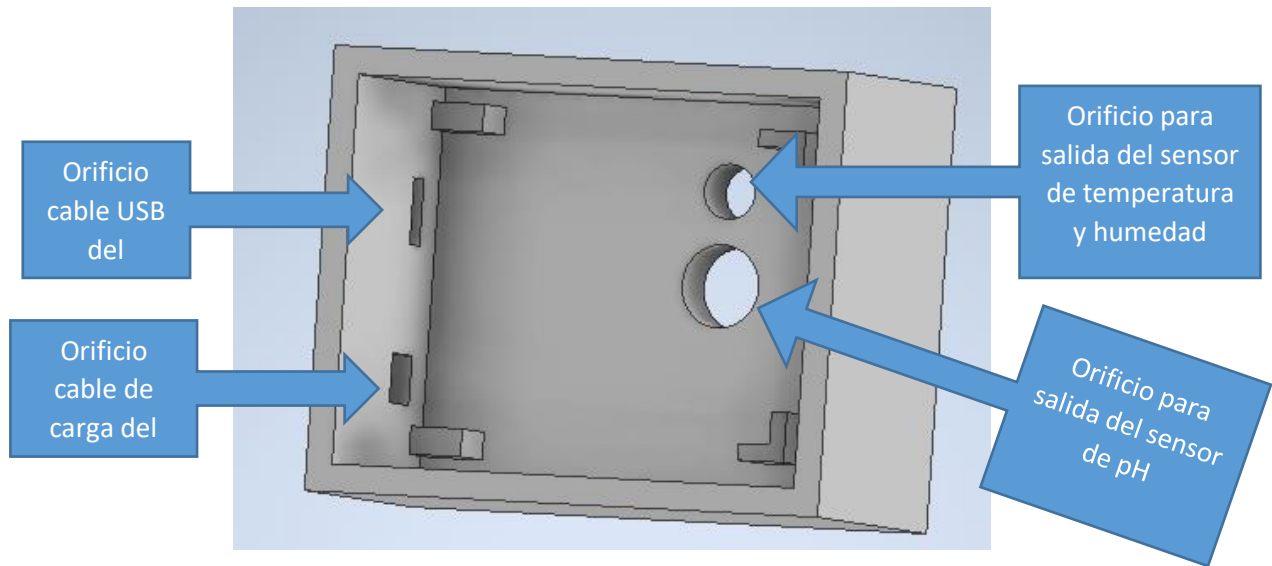


Figura 20. Caja Arduino parte uno. (Fuente los autores).

A continuación, se mostrará en la figura 21 los planos de la caja que contiene el Arduino, donde se verá claramente las dimensiones utilizadas para la construcción de la caja, como se mencionó anteriormente las medidas fueron adquiridas mediante el software Eagle.

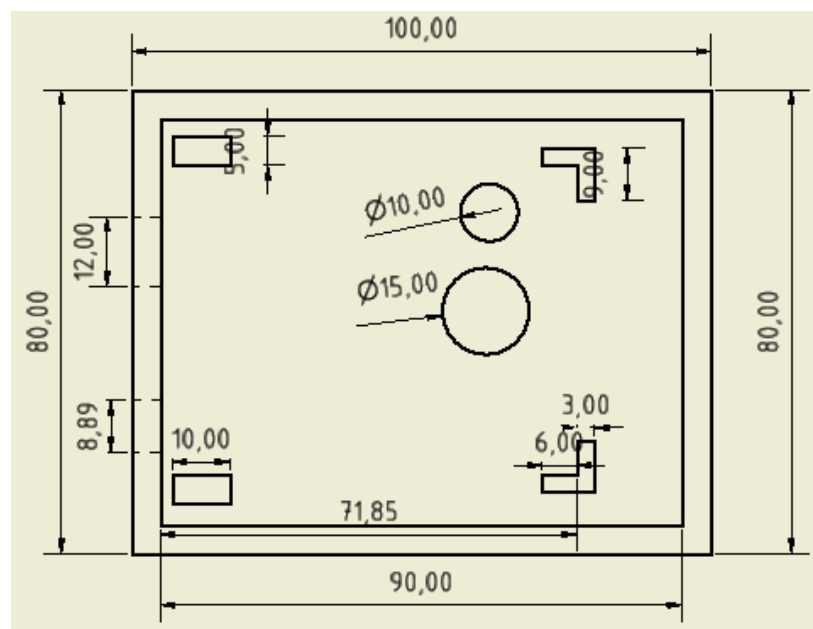


Figura 18. Planos caja Arduino parte uno. (Fuente los autores).

Para el cerrado de la caja se toman las dimensiones, esta parte será para cerrar y proteger la tarjeta electrónica de los medios físicos, en la figura 22 se podrá ver cómo será la parte de la caja terminada.

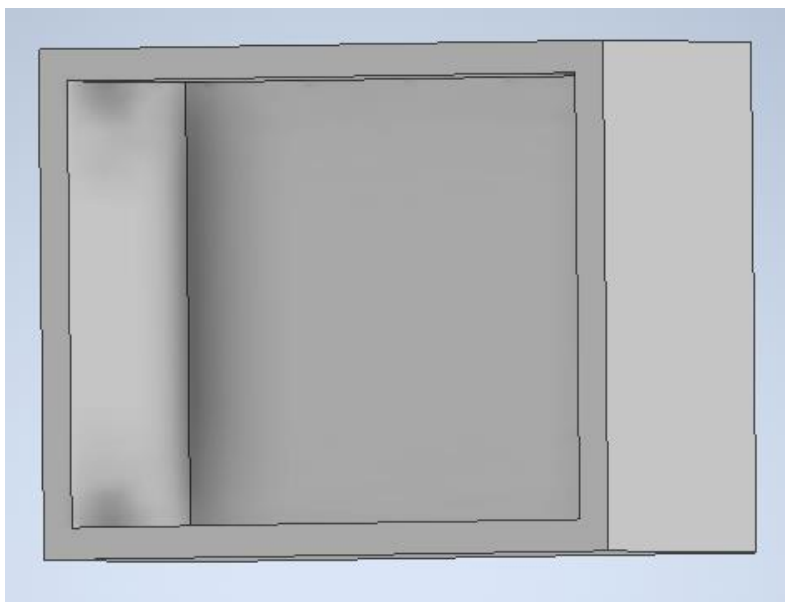


Figura 19. Caja Arduino parte dos. (Fuente los autores).

Se anexa la figura 23 donde se puede observar los planos con los cuales se ven las medidas utilizadas para realización de la segunda parte de la caja.

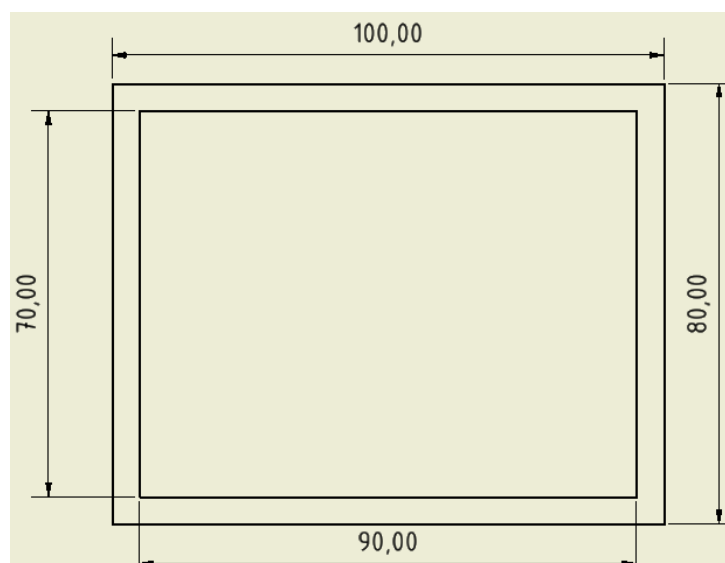


Figura 20. Planos caja Arduino parte dos. (Fuente los autores).

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y por ende como quedaría el diseño del sistema de fermentación tipo escalera del cacao.

5.1 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y CALCULO TEÓRICOS DEL PANEL SOLAR.

En la figura 24, se muestra el circuito de regulación y alimentación del sistema de medición de fermentación del cacao, de tal manera se aprecia como esta etapa del circuito queda en la board, el circuito fue desarrollado en el software EAGLE.

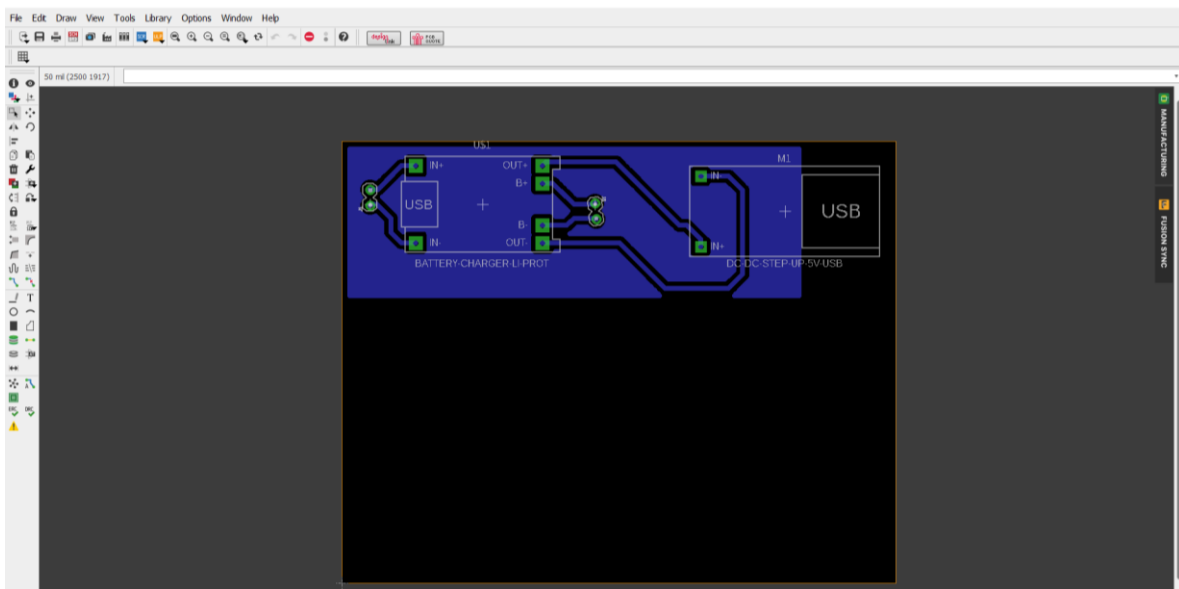


Figura 21. Circuito de regulación y carga de baterías Board. (Fuente los Autores).

En la figura 25 se ve representado el circuito de control en la board, como estará distribuido, en la imagen se puede apreciar el sensor SI7021I2C, el XBee y el Arduino UNO. El circuito fue desarrollado en el software EAGLE.

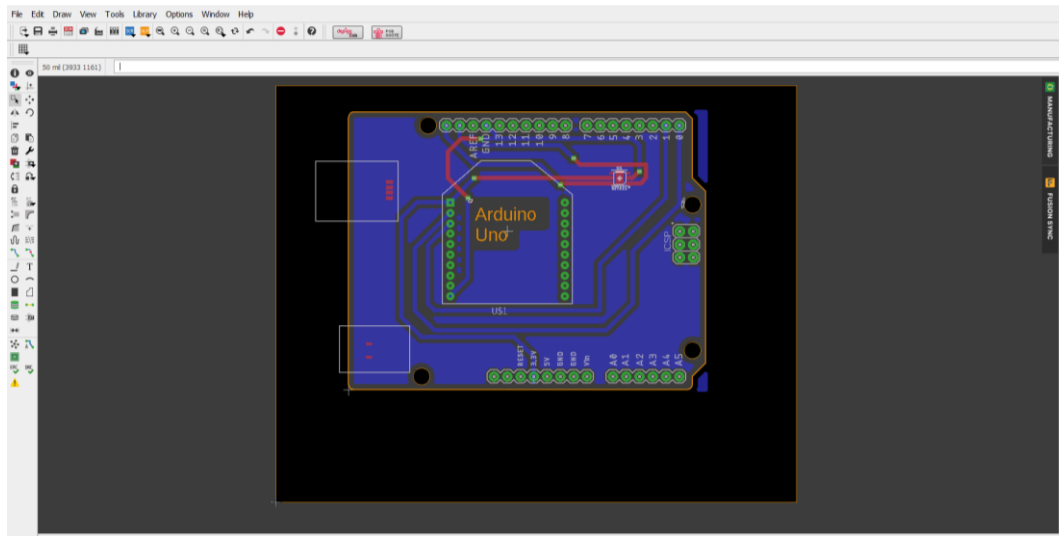


Figura 22. Circuito de control (Fuente los autores).

A continuación, se muestra los cálculos teóricos finales, los cuales muestran la cantidad total de paneles que requiere el sistema y la capacidad de la batería.

Reemplazando en los valores de la ecuación 7, se obtuvo la cantidad de paneles solares capaces de sostener el consumo de energía eléctrica gastada por el circuito. Siendo solo un panel solar de 3W el cual alimentara el sistema de medición.

$$N_{PANELES} = \frac{6,28 \text{ Wh}}{3h * 3W}$$

$$N_{PANELES} = 1$$

Se utilizó una profundidad de descarga de la batería de 0,66, debido a que este valor es baterías comunes. Reemplazando en la formula tenemos lo siguiente:

$$C = \frac{6.28 \text{ W} * 2,5 \text{ días}}{0,66 * 6V}$$

$$C = 4000 \text{ mAh}$$

5.2 DISEÑO DE LA INTERFAZ BÁSICA Y VISUALIZADOR DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL SISTEMA.

En el capítulo 3 donde se desarrolló la interfaz básica se puede observar en la segunda ventana de LabVIEW (panel frontal) como el usuario podrá observar los datos adquiridos por los sensores.

En la figura 26 se puede observar los datos captados cada cinco minutos por el sensor y estos siendo guardados en el panel solar y posterior mente a Excel, además se presentan tres gráficas, las cuales dan a entender el comportamiento de las variables que están involucradas en el sistema de fermentación del cacao.

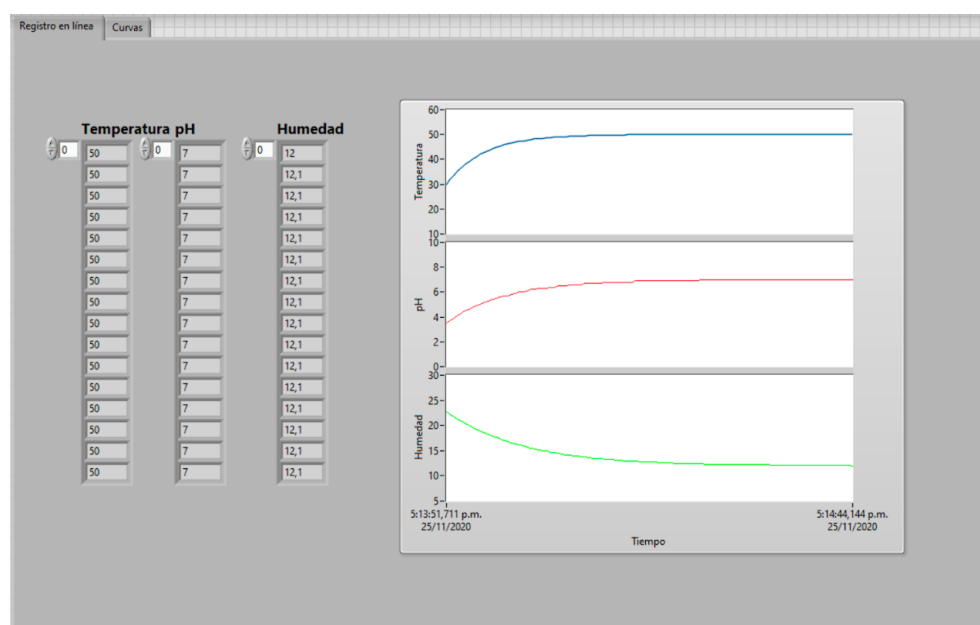


Figura 26. Panel frontal guardado de datos (Fuente los autores).

En la figura 27 se puede apreciar las gráficas de los sensores y sus respectivos indicadores gráficos, además cada indicador cuenta con su indicador digital el cual da el valor exacto del dato captado por el sensor.

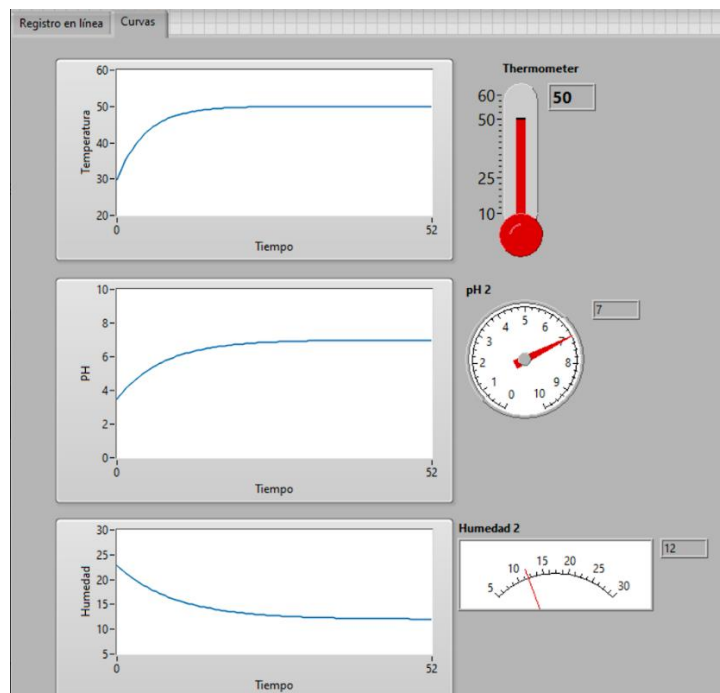


Figura 27. Panel frontal visualizador de datos. (Fuente los autores).

En el capítulo 4 donde se desarrolló la carcasa que protege la parte electrónica del proyecto, en este capítulo se presentaron las partes de cada caja. En la figura 28 y 29 se puede apreciar cómo serán las carcasas terminadas y juntas entre ellas. Se podrán observar las imágenes desde diferentes perfiles para así notar como se verán en su totalidad.

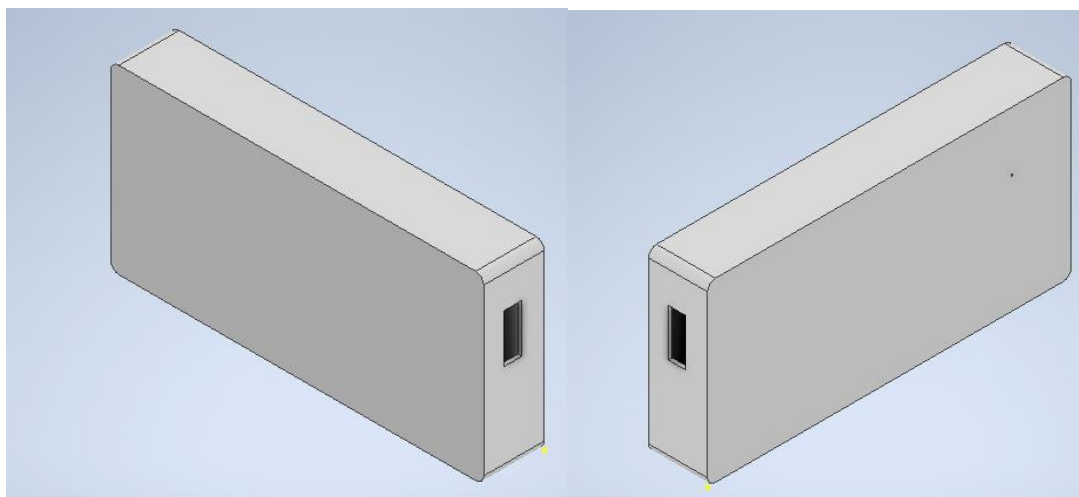


Figura 28. Carcasa sensores terminada. (Fuente los autores)

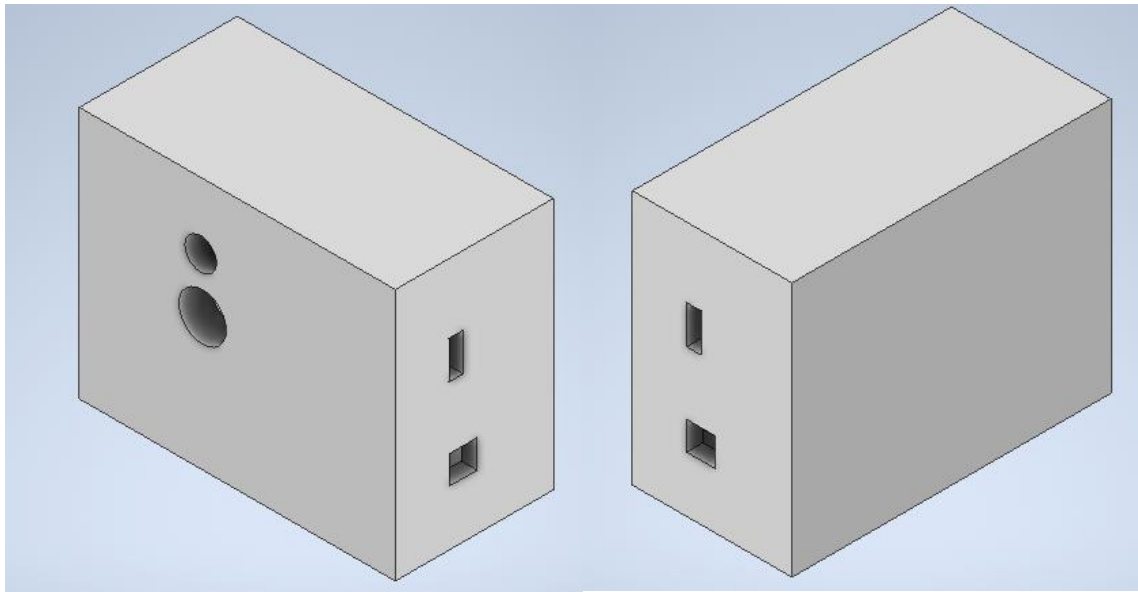


Figura 29. Carcasa Arduino finalizada (Fuente los autores).

En la figura 29 se pueden observar los orificios de los cables para la conexión del Arduino y donde saldrán los sensores para el contacto con el cacao, se puede notar que en la parte posterior irá completamente cubierta para la protección de las partes electrónicas.

CONCLUSIONES

El sistema de fermentación del cacao es la etapa más importante del proceso para obtener todos los subproductos relacionados a este fruto, por ende, resulta de gran importancia el monitoreo y control durante este lapso.

Debido a que los sistemas agrícolas deben de estar con supervisión constante a sus variables el uso de tecnología sustentable y sostenible encaja a la perfección en este campo, además es una gran ayuda que se les puede dar a los cacaoteros, dado que ellos pueden tener información de una fuente confiable y seguir desempeñando sus labores con normalidad.

Al realizar un visualizador de las variables más influyentes del proceso el agricultor puede tener información a la mano y debido a estos datos podrá predecir el resultado final de su proceso, además si se llega a tener datos que no concuerden con lo deseado el cacaotero podrá intervenir a tiempo en el proceso para corregir los errores que se estén presentando.

Se diseñó un sistema mecatrónico que cumple con los requerimientos mínimos indicados en este trabajo, sin embargo, su implementación dará cuenta de los ajustes necesarios para que pueda ser llevado a los ambientes agroindustriales.

RECOMENDACIONES

En cuanto al diseño de la tarjeta electrónica, la PCB se puede realizar en solo una cara, para esto se recomienda utilizar librerías diferentes a las implementadas, debido a que, las librerías que se usaron tienen como condición el corte del área ocupada por el Arduino, si la tarjeta electrónica es realizada por medio de máquina ruteadora y de esta manera se eliminarán los puentes. Además, también se puede obtener una tarjeta electrónica amplia si eso es lo que busca o se tiene proyectado a futuro.

La interfaz básica es una implementación necesaria para conocer y establecer el funcionamiento de los sensores, este medio permite observar las mediciones tomadas por dispositivo de medición, para esto se podría desarrollar que no solo fuese como visualización sino también desarrollar un guardado de datos, por lo mencionado anteriormente, se recomienda que proyectos futuros tengan en cuenta el guardado de datos, debido a que con estos datos se puede realizar un estudio estadístico que podrá definir si el proceso que se está llevando a cabo es el más apto para el resultado que desea el agricultor.

Para el uso de los sensores mencionados en el capítulo 2, es necesario la implementación su respectiva programación en el software Arduino, dado que en LabVIEW no se cuentan con estas librerías.

Se recomienda ubicar la caja en una posición donde el nivel de radiación solar sea óptimo para garantizar un mejor funcionamiento.

Bibliografía

- [1] M. L. L. Cuetos, "Investigación e integración: la ruta del cacao en América Latina," 2007. [Online]. Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/26636/1/Ruta_cacao.pdf.
- [2] J. M. O. Sevilla, "La elaboración del chocolate, una técnica dulce y ecológica," 2007. [Online]. Available: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/28/37/a37.pdf>.
- [3] FEDECACAO, "Federación nacional de cacaoteros," 2018-2019. [Online]. Available: <https://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-02-12-17-20-59/internacionales>.
- [4] V. C. Ávalos, M. S. Hernández, N. G. E. Chulím and E. S. Castro, "FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN EL EJIDO FRANCISCO I. MADERO DEL PLAN CHONTALPA, TABASCO, MÉXICO," 2001. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/154/15403405.pdf>.
- [5] M. A. P. Beltran, "Guía de buenas prácticas de cosecha, fermentación y secado para la producción de casos especiales.," [Online]. Available: https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Colombia/Documents/Guia_de_buenas_practicas_de_poscosecha.pdf.
- [6] Á. M. Hernandez, "Sistema de riego automatizado por micro aspersión para el cultivo de cacao en el municipio de Cabuyaro en el departamento del Meta," 2019.
- [7] R. P. C. Bohorquez, "Automatización de un sistema de fermentación de almendras de cacao para pequeños productores," 2019.
- [8] A. d. P. S. Vargas, O. F. C. Domínguez and K. P. D. Martínez, "Mejoramiento de la poscosecha del cacao a partir del roadmapping," 2008. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v23n3/v28n3a22.pdf>.
- [9] S. C. A. Bonilla and M. V. Villarraga, "Diagnostico tecnológico del cultivo de cacao en el municipio de el dorado, departamento del Meta," 2006.
- [10] I. Morán and J. Villavicencio, "FACTIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CACAO," 30 Abril 2008. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/143431064.pdf>.
- [11] E. Ayestas, C. V. Jarquín, P. Torres, J. Lanzas and L. Orozco, "Puntos críticos del manejo poscosecha de cacao en Waslala, Nicaragua," Mayo 2014. [Online]. Available: <https://www.camjol.info/index.php/CALERA/article/view/2650/2401>.

- [12] L. J. Moreno and J. A. Sanchez, Beneficios del cacao, Diciembre 1989. [Online]. Available:
https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36812834/Beneficio_del_Cacao.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DBeneficio_del_Cacao.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191122%2Fus-east-1%2Fs3.
- [13] SISCODE, "Sensores Perú," Diciembre 2015. [Online]. Available:
[http://siscode.com/..](http://siscode.com/)
- [14] R. Delgado and J. Lazarte, "Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional".
- [15] W. F. T. Llerena, "Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao," 2016.